



Pedro Gonçalo da Conceição Lopes Homem

Licenciado em Engenharia Mecânica – I.S.T.

**Estimação do desempenho de um veículo a
pedais com assistência eléctrica equipado com
painéis solares fotovoltaicos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão , Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor João José Lopes de Carvalho, Professor
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor António Manuel Flores Romão de Azevedo
Gonçalves Coelho, Professor Catedrático da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal(ais): Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa

Doutor João José Lopes de Carvalho, Professor Auxiliar
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa

Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Dissertação de Mestrado

Autor: Pedro Gonçalo da Conceição Lopes Homem

Título: Estimação do desempenho de um veículo a pedais com assistência eléctrica equipado com painéis solares fotovoltaicos

Instituição: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Local: Lisboa

Ano: 2012

Endereço: DEMI – FCT – UNL, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal

Copyright © Pedro Gonçalo da Conceição Lopes Homem, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que colaboraram de modo tão empenhado no desenvolvimento e produção dos meus *trikes* nos últimos anos, e que contribuíram para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Em segundo lugar agradeço ao Prof. António Mourão a forma como sempre me apoiou e orientou na concretização trabalho.

Agradeço também à minha família o apoio incondicional, paciência e compreensão pela minha ausência durante todo o tempo dedicado a este projecto.

Finalmente, gostaria de dedicar este trabalho à memória do Professor Pedro Barbosa Rodrigues, que há muitos anos me mostrou que a engenharia também pode e deve ser vivida com gosto e paixão.

Simbologia e notações

.HRM	Formato nativo para o software POLAR para registos de treino
.PLT	Formato nativo para o software OZI-Explorer para trajectos
A	Área frontal total (veículo + condutor)
A_{sol}	Área de painéis solares fotovoltaicos
CAD	Computer Aided Design (desenho assistido por computador)
C_d	Coeficiente de arrasto aerodinâmico
C_m	Coeficiente de perdas mecânicas e de transmissão de potência
C_r	Coeficiente de resistência ao rolamento
C_{rV}	Coeficiente dinâmico de resistência ao rolamento, dependente da velocidade do veículo
C_{rVn}	Componente normal do coeficiente dinâmico de resistência ao rolamento ; $C_{rVn} = C_{rV} \cdot \cos(\beta)$
e-bike	Veículo a pedal com assistência eléctrica até 25 Km/h e 250W (legislação UE)
E_{ei}	Consumo eléctrico da bateria durante o troço
E_{sol i}	Carga solar durante o troço
F_{rg}	Força resistente
G	Aceleração da gravidade
GPS	Sistema de posicionamento global
H_i	Direcção do movimento num troço do percurso
H_{nn}	Altitude acima do nível do mar
Hw	Direcção do vento
L_i	Distância percorrida até ao troço
Lat_i	Coordenada em latitude de um ponto geográfico
Long_i	Coordenada em longitude de um ponto geográfico
m_{bike}	Massa do veículo
m_{rider}	Massa do condutor
p	Expoente da lei de perfil vertical de velocidade de vento
P	Potência total motriz, pressão do ar
P₀	Pressão do ar ao nível do mar a 0°Celsius
PElec	Potência eléctrica
PHum	Potência humana
P_{sol}	Densidade da potência da radiação solar
Q_{ini}	Carga inicial da bateria
Q_i	Carga da bateria no troço
Q_{lim}	Carga mínima para limite de utilização da bateria
R	Raio da Terra
T	Temperatura do ar
t_i	Duração do percurso até ao troço
track	Percurso definido pela posição inicial e final em troços consecutivos
trike	Triciclo reclinado a pedal
V	Velocidade do veículo
V_{e-lim}	Velocidade limite de assistência eléctrica

V_{w0}	Velocidade do vento na altura
V_{wmeteo}	Velocidade do vento no sensor
W	Velocidade do vento frontal
W_{vcrit}	Velocidade do vento crítica
Z_0	Altitude
Z_{meteo}	Altitude do sensor
β	Ângulo de inclinação do declive
ΔL_i	Comprimento de um troço do percurso
Δt_i	Duração do troço
ρ	Massa específica do ar
ρ_0	Massa específica ao nível do mar a 0°Celsius

Sumário

Esta dissertação procede à análise e avaliação de estimativas de desempenho e condições de operação para um veículo a pedais com assistência eléctrica, equipado com painéis solares fotovoltaicos, de modo a poder quantificar as respectivas vantagens, relativamente às outras opções actualmente disponíveis no mercado.

Este é um trabalho exploratório, com vista a validar a pertinência deste tipo de veículo no contexto actual e suportar futuras iniciativas de investigação e desenvolvimento mais profundas desta temática.

Pretende-se promover a integração de componentes e sistemas facilmente disponíveis no mercado, que permitam um início de utilização num espaço de tempo reduzido, a custos razoáveis e não orientar o desenvolvimento do veículo para soluções sofisticadas e tecnologias de ponta. Deste modo, após uma análise e selecção entre os equipamentos disponíveis nos canais comerciais, foi desenvolvido um projecto preliminar simplificado de um veículo, designado por *e-Trike Solar*, que será o objecto do estudo.

Para efectuar esta análise comparativa de desempenho, optou-se por desenvolver uma aplicação que permitisse a estimativa téorica do desempenho dinâmico de diferentes veículos a pedal, em determinadas condições ambientais, e num dado percurso.

Foram identificados os parâmetros significativos no desempenho dinâmico de um veículo, assim como as leis e fórmulas envolvidas, e juntamente com um algoritmo de importação de percursos de um GPS, foi desenvolvida a aplicação, baseada numa tabela de cálculo do MS Excel. Esta ferramenta, designada por Estimador de Percursos, permite a comparação entre diferentes configurações de veículos em condições exactamente idênticas, e com possibilidade de simular de modo exaustivo, as consequências que a alteração de uma determinada característica ou especificação terá em termos de desempenho final.

A capacidade de seleccionar qualquer percurso, e de fazer uma análise global, constitui um contributo importante, dado que actualmente apenas estão disponíveis ferramentas que descrevem o desempenho pontual.

Os resultados obtidos no Estimador de Percursos revelaram-se consistentes com os dados experimentais, pelo que foram considerados adequados, e validados para uso no domínio do estudo.

As simulações foram efectuadas, comparando o desempenho com outros 3 veículos (bicicleta convencional ROSE PRO2, *e-bike* ROSE PRO E1, *e-trike* e *e-trike Solar*), em diferentes percursos e condições ambientais.

Abstract

This thesis is focused to the analysis and evaluation of performance estimations, and the operational conditions of a human powered vehicle, with an electric power assistance kit and equipped with photovoltaic solar panels, in order to assess and quantify the advantages, regarding other options already available in the market.

This is an exploratory work, aimed to validate the pertinence of this type of vehicle concept in the actual context, and to support further study and development in this field of investigation.

The purpose is to promote the integration of current and market available components and systems, that allow a quick implementation and use, at reasonable prices, and not to focus on high-tech and state-of-the art technologies and solutions. After a survey on commercially existing equipments, the concept was developed to a simplified vehicle project, designated Solar e-Trike, and it will be the subject of this study.

To perform this comparison analysis, the option was towards the development of an application that allowed estimating theoretically the expected performance of different pedal vehicles, in a certain environmental conditions, and at a certain track.

The key factors in the vehicle's dynamics were identified, as for the motions laws and equations involved, and together with a GPS track import algorithm, the application was implemented, based on a MS Excel spreadsheet. This tool, designated Track Estimator, allows the comparison between different vehicle configurations in exactly identical conditions, and has the possibility to simulate in an exhaustive way, the consequences in which the modification of a certain feature or parameter will affect the final performance.

The possibility to select and import any track, and to perform a global performance analysis is a major contribute, for the other tools available are only able to estimate performance for single set of conditions.

The theoretical results obtained from the Track Estimator were consistent with experimental data, so this tool was considered validated and adequate for use in the scope of this study.

Different simulations were performed, comparing the performance with other 3 types of pedal vehicles (conventional bike, e-bike, e-trike, Solar e-Trike) in a wide range of tracks and environmental conditions.

Índice de Matérias

AGRADECIMENTOS	II
SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES	IV
SUMÁRIO	VI
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE DE MATÉRIAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABELAS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivo da Dissertação	1
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
1.4. Protótipo.....	5
2. ENQUADRAMENTO	7
2.1. O fim das reservas de combustíveis fósseis e o despertar de uma nova consciência ecológica.....	7
2.2. Um novo paradigma em termos de meios de transporte individual para o futuro 8	
2.3. Equipamentos e soluções disponíveis no mercado.....	10
3. VEÍCULO DE PROPULSÃO HUMANA COM PEDALADA ASSISTIDA E EQUIPADO COM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO.....	15
3.1. Definição das características e especificações do veículo.....	15
3.2. Pré-selecção de componentes e de sistemas	17
3.3. Experiência anterior em projecto de veículos de propulsão humana	19
3.4. Desenvolvimento e modelação 3D do veículo.....	23
4. CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DE MOVIMENTO DO VEÍCULO	31
4.1. Determinação dos parâmetros significativos para a caracterização dinâmica do veículo	31
4.1.1. Potência motriz – P	33
4.1.2. Velocidade do vento frontal - W	35
4.2. Caracterização dos troços de um percurso obtido com recurso a um receptor GPS	36

4.3.	Estimador de percursos – implementação em suporte informático	37
5.	TESTES E VALIDAÇÃO DO ESTIMADOR DE PERCURSOS	43
5.1.	Avaliação dos meios disponíveis para os testes.....	43
5.2.	Definição dos testes e respectiva metodologia	45
5.3.	Resultados dos testes	46
5.3.1.	Comparação com o Estimador Kreuzotter.....	46
5.3.2.	Comparação com testes reais.....	47
5.4.	Testes complementares.....	50
5.5.	Validação do Estimador de Percursos - Análise e conclusões.....	51
6.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO VEÍCULO	53
6.1.	Determinação das condições de avaliação (percursos e condições atmosféricas)	53
6.2.	Veículos de referência para comparação de desempenho	56
6.2.1.	ROSE PRO2	56
6.2.2.	ROSE PRO E1.....	57
6.2.3.	<i>Trike</i> com kit eléctrico	58
6.2.4.	<i>Trike</i> com <i>kit</i> eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos.....	59
6.3.	Preços de referência para os veículos.....	60
6.4.	Ensaios de comparação de desempenho e respectivos resultados.....	61
6.5.	Análise de resultados dos ensaios	63
6.5.1.	Análise do desempenho no percurso aos 40 km.....	63
6.5.2.	Análise do desempenho no final do percurso de 63 km.....	64
6.5.3.	Análise do desempenho em condições de carga extra	65
6.5.4.	Análise do desempenho em condições de carga extra e sem restrições legais.....	65
6.5.5.	Análise do desempenho em percursos longos	66
7.	CONCLUSÕES	69
7.1.	<i>Trike</i> com <i>Kit</i> Eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos - Limitações e desvantagens	69
7.2.	<i>Trike</i> com <i>Kit</i> eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos – Vantagens e potencial de desenvolvimento	70
7.3.	Conclusões finais e sugestões para investigação futura	71

7.3.1. Conclusões finais	71
7.3.2. Sugestões para investigação futura	72
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	77
ANEXO 1 – PROPOSTA DE PROJECTO PARA DISSERTAÇÃO (1/3/2012)	
ANEXO 2 – PLANO DE TRABALHO – VERSÃO PRELIMINAR (6/3/2012)	

Índice de figuras

Figura 1.1: Fluxograma de tarefas do trabalho	3
Figura 2.2: Novo desportivo eléctrico da marca Porsche.....	7
Figura 2.3: Rede ciclável de Lisboa - Percursos de bicicleta existentes ou em projecto – C.M.L. [2]	9
Figura 2.4: Competições de veículos eléctricos [5]	11
Figura 2.5: <i>Trike</i> tandem solar equipado com atrelado [7].....	11
Figura 2.6: Atrelado com painéis solares [10]	12
Figura 2.7: Bicicleta eléctrica equipada com painéis solares [12].....	12
Figura 2.8: Competição de veículos a pedal solares [13]	13
Figura 2.9: Veículo da equipa Kensington Centre [14].....	13
Figura 2.10: Classificações finais da prova [14].....	14
Figura 3.11: Configuração inicial, com painéis montados na lateral	15
Figura 3.12: Configuração final, com painéis montados no topo	16
Figura 3.13: Configuração final, com o afastamento entre os painéis	16
Figura 3.14: Protótipo com o módulo de transmissão com um cubo dínamo integrado	17
Figura 3.15: <i>Trike</i> versão MkI (2009)	19
Figura 3.16: Maqueta em madeira para validação ergonómica (2009)	19
Figura 3.17: Engenharia inversa do banco Optima (2010)	20
Figura 3.18: Medição de quadro Rockrider 6.3 para determinação da geometria da suspensão (2010).....	20
Figura 3.19: Digitalização do triângulo posterior Rockrider (2011)	21
Figura 3.20: Construção de molde e réplicas do banco Optima em fibra de vidro (2011).....	21
Figura 3.21: Componentes do <i>Trike</i> Mk III após soldadura (2011).....	22
Figura 3.22: Inspeção e medição do quadro após soldadura (2011).....	22
Figura 3.23: Comparação dos elementos medidos com o CAD (2011).....	23
Figura 3.24: <i>Trikes</i> versão Mk II e Mk III (2012).....	23
Figura 3.25: Detalhe da traseira do veículo, com o motor eléctrico e triângulo de suspensão traseiro.....	24
Figura 3.26: Detalhe da traseira do veículo,mostrando o módulo de transmissão e tirante de d direcção	24

Figura 3.27: Detalhe da dianteira do veículo,mostrando a bateria, e os comandos no guiador	24
Figura 3.28: Vistas do modelo CAD do veículo.....	25
Figura 3.29: Vistas do modelo CAD do quadro	27
Figura 4.30: Valores de potência sustentável para humanos [40]	34
Figura 4.31: Aspecto geral do separador RESUMO	37
Figura 4.32: Aspecto geral do separador CALCULO	38
Figura 4.33: Diagrama de cálculos no Estimador de Percursos	39
Figura 4.34: Aspecto geral do separador FICHEIRO_PLT	41
Figura 4.35: Aspecto geral do separador AJUDA_IMPORTACAO	41
Figura 5.36: Bicicleta Cube Lightning 2001 utilizada nos testes.....	43
Figura 5.37: Sensor de potência Polar	44
Figura 5.38: Equipamento de monitorização do percurso : monitor Polar S725X, GPS Magellan e nível de bolha	44
Figura 5.39: Itinerário do percurso utilizado para apoio do ciclista	45
Figura 5.40: Comparação dos valores de velocidade determinadas pelo estimador de percursos e o site Kreuzotter	46
Figura 5.41: Teste de 24/5/12 - Comparação de valores de potência	48
Figura 5.42: Teste de 24/5/12 - Comparação de valores de velocidade	48
Figura 5.43: Teste de 27/5/12 - Comparação de valores de potência	49
Figura 5.44: Teste de 27/7/12 - Comparação de valores de velocidade	49
Figura 5.45: Rolo de treino Tacx i-Magic	50
Figura 5.46: Travão electromagnético do rolo.....	51
Figura 5.47: Software TTS 2 com simulação de percursos	51
Figura 6. 48: Percurso seleccionado para os testes comparativos	53
Figura 6.49: Valores de referência para a região de Lisboa [48].....	54
Figura 6.50: Percurso Tróia-Sagres	55
Figura 6.51: Bicicleta convencional Rose PRO2	56
Figura 6.52: Bicicleta eléctrica Rose PRO E1.....	57
Figura 6.53: Triciclo reclinado com kit eléctrico	58
Figura 6.54: Trike reclinado com kit eléctrico e equipado com painéis solares fotovoltaicos.	59

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Selecção do kit eléctrico.....	18
Tabela 3.2 – Selecção do sistema fotovoltaico	18
Tabela 3.3 – Peso total do veículo (por componentes).....	29
Tabela 4.4 – Descrição das variáveis das equações da dinâmica do veículo	33
Tabela 4.5 – Valores assumidos de potência humana aplicada.....	34
Tabela 4.6 – Valores assumidos de potência eléctrica assistida.....	35
Tabela 5.7 – Condições dos testes reais	47
Tabela 5.8 – Parâmetros comuns utilizados	47
Tabela 5.9 – Resumo dos resultados.....	47
Tabela 6.10 – Parâmetros de assistência eléctrica extra.....	54
Tabela 6.11 – Características específicas da ROSE PRO2	56
Tabela 6.12 – Características específicas da ROSE PRO E1 [50].....	57
Tabela 6.13 – Características específicas do Trike com kit eléctrico	58
Tabela 6.14 – Características específicas do <i>Trike</i> com <i>kit</i> eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos	59
Tabela 6.15 – Preços de referência	60
Tabela 6.16 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 10km/h.....	61
Tabela 6.17 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 20km/h.....	61
Tabela 6.18 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 30km/h.....	62
Tabela 6.19 – Resultados no percurso de 193km, com vento de 20km/h (Oeste).....	62

1. Introdução

1.1. Motivação

Desde o início desta década que se verificou uma profusão na utilização de *kits* de pedalada assistida electricamente e de *e-bikes*. O ritmo com que estes equipamentos têm sido melhorados e optimizados, veio permitir que se possa encarar os veículos híbridos (com misto de propulsão humana e com energia de fontes renováveis) como uma séria alternativa a alguns meios de transporte tradicionais.

Não há por agora qualquer viabilidade na substituição generalizada dos veículos movidos a combustíveis fósseis, mas para certas aplicações de âmbitos específicos, pode ser uma opção válida, e poderá abrir o caminho a novos desenvolvimentos futuros, em termos da evolução dos vulgarmente denominados veículos ecológicos.

No entanto, o desenvolvimento e construção de um protótipo funcional envolve ainda um investimento, fora do âmbito de uma actividade amadora e de lazer, pelo que fará todo o sentido avaliar o desempenho expectável, de modo quantificável, deste tipo de veículos antes de se dar início a um trabalho mais vasto e exaustivo.

O autor tem-se dedicado nos últimos anos ao desenvolvimento de alguns veículos de propulsão humana apenas como um passatempo, contudo tem a percepção que algumas das soluções em termos de mobilidade passarão num futuro próximo por este tipo de abordagens menos convencionais.

1.2. Objectivo da Dissertação

Este trabalho tem como objectivo comparar o desempenho expectável de um veículo a pedais com assistência eléctrica e equipado com painéis fotovoltaicos, relativamente a outras alternativas mais convencionais disponíveis actualmente no mercado, quantificando as eventuais vantagens e limitações (Anexo-1).

Deverá servir para que decisores e/ou investidores possam justificar, a atribuição dos recursos necessários ao desenvolvimento, construção, optimização, e quem sabe até, a industrialização, deste tipo de veículos.

A ferramenta que irá permitir gerar esses resultados é designada por Estimador de Percursos e é o elemento central desta dissertação.

Inicialmente será feito um estudo em termos da dinâmica de movimento de um dado veículo, das leis e equações, dos parâmetros e grandezas envolvidas, dos valores

em questão para cada uma delas. Passaremos à sua implementação em suporte informático, assim como o método para importar qualquer percurso que possa ser recolhido por um GPS ou gerado numa aplicação com mapas digitais.

Serão efectuados testes em condições reais e comparados com os valores que são previstos no estimador, de modo a aferir a semelhança entre ambos, e assegurar um bom nível de confiança para os resultados obtidos.

Será elaborado um projecto preliminar para um veículo a pedais com assistência eléctrica equipado com painéis fotovoltaicos, seleccionado componentes disponíveis no mercado, definindo modo simplificado os componentes específicos necessários, de modo a obter as suas características significativas (peso, área frontal, etc.).

Serão seleccionados veículos de referência para uma análise comparativa do desempenho, sempre em condições idênticas, e abrangendo um vasto leque de condições de operação.

Os resultados serão analisados de modo a avaliar as vantagens deste tipo de veículo e o respectivo potencial em termos de desenvolvimentos futuros.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em 7 capítulos, cada um abordando um distinto conjunto de actividades sequenciais e que se relacionam de modo a permitir atingir os objectivos previstos.

A sequência do trabalho efectuado, as interacções entre as diferentes componentes podem ser analisadas de modo mais perceptível no fluxograma de tarefas, apresentado na (ver Figura 1.1), que traduz a metodologia da abordagem para este trabalho.

Assim teremos:

Capítulo 1 – Introdução – onde são apresentados os objectivos da dissertação e a estrutura

Capítulo 2 – Enquadramento – no qual é feita uma análise da situação actual em termos de desafios aos meios de transporte alternativos para o futuro e das novas tendências do mercado e dos equipamentos e sistemas disponíveis.

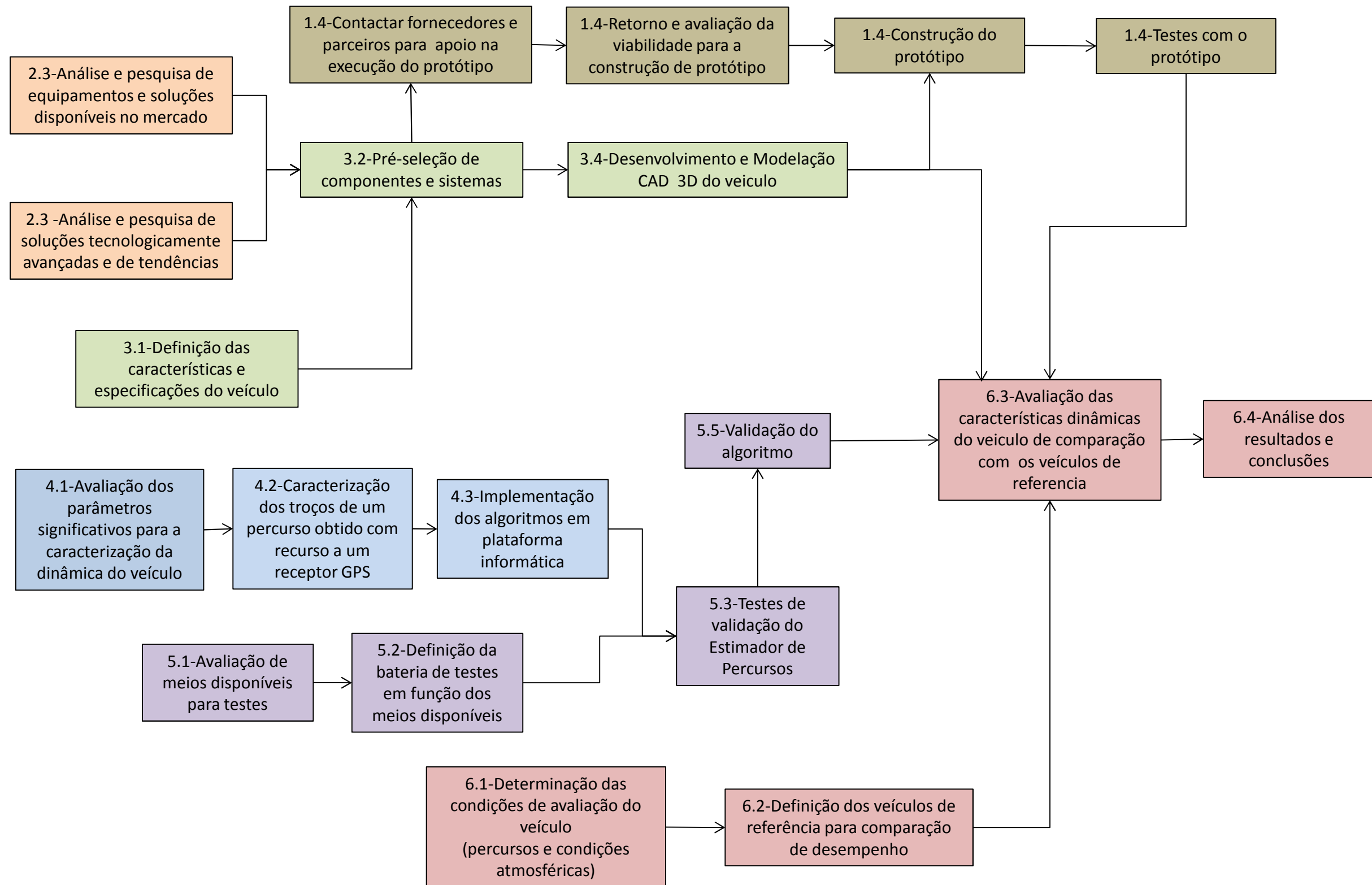


Figura 1. 1: Fluxograma de tarefas do trabalho

Capítulo 3 – Veículo de propulsão humana com pedalada assistida e equipado com painel solar fotovoltaico – apresentação do pré projecto do veículo, as suas características principais e os componentes seleccionados, assim como um breve histórico da experiência e do trabalho anterior desenvolvidos pelo autor, que serviu de referência e ponto de partida.

Capítulo 4 – Caracterização da dinâmica de movimento do veículo – os parâmetros significativos da dinâmica do veículo são identificados, assim como as equações que os regem. São definidos algoritmos relativos à acção do condutor (potência e nível de assistência eléctrica) em função das condições ao longo do percurso. Implementação em suporte informático desta informação de modo a permitir a previsão do desempenho de um dado veículo num determinado trajecto, importado de um *track* GPS

Capítulo 5 – Testes e validação do Estimador de Percursos – são apresentados os meios disponíveis e os testes definidos. Os resultados teóricos obtidos são analisados e comparados com os dados experimentais.

Capítulo 6 – Avaliação de desempenho do veículo – são definidos os veículos de referência para comparação, os respectivos parâmetros, o custo de cada um e os resultados do desempenho expectável.

Capítulo 7 – Conclusão – são expostas as conclusões face aos resultados obtidos e sugestões para desenvolvimentos e investigações futuras

1.4. Protótipo

A possibilidade de se construir um protótipo funcional foi equacionada desde o início do trabalho, e as diferentes tarefas relacionadas foram apresentadas e consideradas no seu planeamento inicial (Anexo-2). Dada a inexistência de qualquer financiamento (e do facto do autor não ter condição para suportar na integra esse encargo), para a aquisição de serviços ou de materiais necessários para a sua construção, tal estaria condicionado aos apoios que se pudessem obter junto de diversas entidade e empresas.

Para além da opção de construir um veículo completo de raiz, existia ainda a possibilidade de se adaptar um dos veículos (ou alguns dos componentes) do autor de modo a permitir a instalação do kit eléctrico e dos painéis solares, com um custo significativamente inferior.

Foram contactados diversas empresas, tanto em termos de metalomecânica e construção metálica, como de fornecedores dos equipamentos.

Se algumas das empresas locais mostraram alguma abertura para fornecerem alguns dos componentes para o quadro, por parte dos distribuidores e vendedores as poucas respostas recebidas apenas contemplavam a aquisição dos equipamentos em condições mais favoráveis.

Assim, e infelizmente, não foi possível prosseguir nesta vertente inicialmente considerada no trabalho, mas que mesmo assim fica mencionada na dissertação, pois poderia ser uma mais valia significativa em termos de melhoria da confiança nos resultados obtidos e sustentação das conclusões finais.

2. Enquadramento

2.1. O fim das reservas de combustíveis fósseis e o despertar de uma nova consciência ecológica

O ano de 2012 apresenta-nos um panorama mundial bem distinto das fabulosas previsões e expectativas para o século XXI que foram sendo criadas desde meados do século XX.

É num contexto de crise económica, de instabilidade social, de uma consciencialização cada vez mais geral das consequências do aquecimento global e escalada dos preços dos combustíveis fósseis que surge uma nova atitude quanto aos meios de transporte e mobilidade individuais.

Uma consciência ecológica crescente e a adesão às causas das energias renováveis e “limpas” levam a uma nova atitude por parte dos consumidores, e a uma mudança na lógica associada aos mecanismos da decisão de compra.

Factores como o impacto ambiental, os custos por quilómetro percorrido, o investimento inicial e o potencial de poupança a prazo são cada vez mais determinantes nas escolhas de compras na nossa sociedade.

A estas novas necessidades nos consumidores, as diferentes marcas internacionais e grandes grupos económicos reagiram inicialmente de uma forma algo hesitante, mas verificou-se uma inversão e hoje em dia percebemos uma mudança drástica nas estratégias de comunicação e *marketing*. Mesmo no conservador mercado automóvel, muitas vezes as vedetas dos salões são as estreias dos novos veículos ecológicos, e não há praticamente nenhum construtor, mesmo os mais surpreendentes, que não tenha um veículo eléctrico ou híbrido nas suas gamas (ver Figura 2.2).



Figura 2.2: Novo desportivo eléctrico da marca Porsche

E é precisamente a inevitabilidade do fim das reservas mundiais de combustíveis fósseis que coloca a maior ameaça ao sector automóvel e à nossa percepção de quais as soluções de transporte e mobilidade para o futuro.

Para já, e de um modo evidente, sentimos esse receio mundial no preço cada vez mais elevado, cada vez que abastecemos o automóvel.

2.2. Um novo paradigma em termos de meios de transporte individual para o futuro

Paralelamente verifica-se um fenómeno de aumento da obesidade e sedentarismo nas populações e há uma preocupação crescente em aderir a estilos de vida mais saudáveis, com uma maior componente de actividade física, que pode ser integrada no nosso dia-a-dia [1].

Foi precisamente no sector das bicicletas que as maiores mudanças se verificaram.

De uma área de negócio quase falida no final dos anos 80, em que a bicicleta era ainda encarada como meio de transporte dos pobres, o surgimento da bicicleta de montanha nos anos 90 do Século XX, levou a indústria a mudar para um mercado vocacionado essencialmente para o lazer e o desporto para todos, transformando-a, e criando os gigantes que dominam hoje o mercado global.

É hoje uma indústria de tecnologia de ponta, competitiva, extremamente dinâmica e em constante expansão.

Voltando-se entretanto a abordar a questão da bicicleta como um meio de transporte alternativo, não para pobres, mas para os cidadãos responsáveis e preocupados com a sustentabilidade da nossa sociedade de consumo.

Embora em alguns países europeus, a tradição da utilização regular da bicicleta como meio de transporte, maioritariamente urbano, nunca tenha desaparecido, foi com o aparecimento das novas bicicletas eléctricas com preços acessíveis e com autonomias bastante interessantes, que o panorama mudou de um modo global.

Sendo os países nórdicos ainda os grandes motores desta mudança, actualmente a procura e utilização deste tipo de veículo é já significativa e em franca expansão tanto na América do norte como no sul da Europa.

Esta nova apetência pela bicicleta como meio de transporte tem ganho muitos adeptos também em Portugal. Apenas os factores limitativos da nossa rede viária, sem um planeamento eficaz e totalmente centrada nas necessidades dos veículos automóveis, têm limitado uma maior expansão.

É uma realidade que têm aumentado as preocupações das autoridades, pelo que vão surgindo ciclovias e infraestruturas de apoio um pouco por todo o país, mas na maioria dos casos sem qualquer preocupação de integração na rede viária urbana ou sem grande utilidade em termos de transporte e mobilidade individual.

Contudo a mentalidade em Portugal está a mudar e mesmo numa cidade como Lisboa, com uma geografia tão pouco favorável à utilização da bicicleta, existe um ambicioso plano para a implementação de uma rede de ciclovias (ver Figura 2.3).

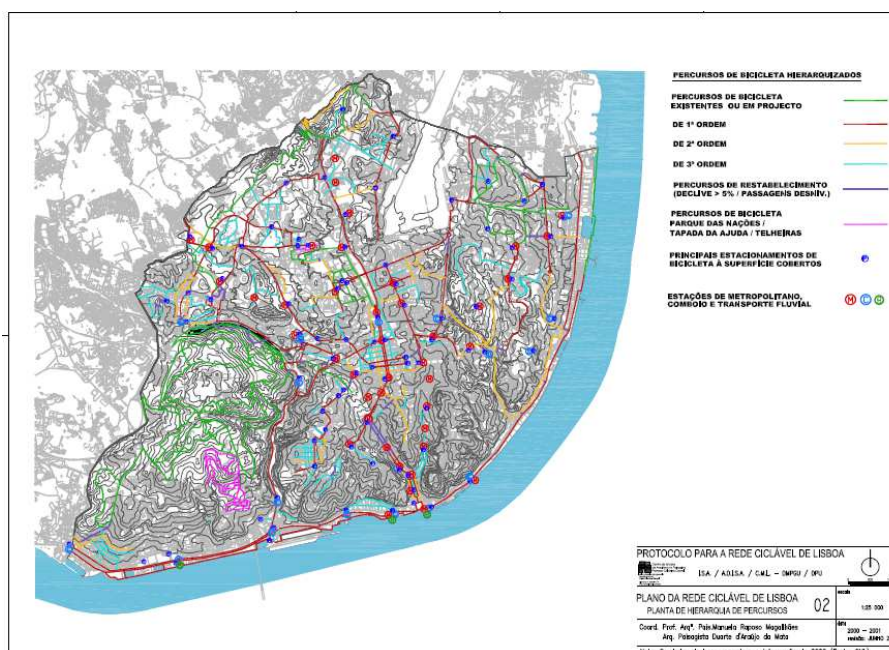


Figura 2.3: Rede ciclável de Lisboa - Percursos de bicicleta existentes ou em projecto – C.M.L. [2]

Motivações como o ganho de tempo nas deslocações para o local de trabalho, a poupança em custos de combustível e manutenção, os elevados custos de estacionamento nas grandes cidades, o abandono do sedentarismo pela prática regular de exercício físico, levam cada vez mais indivíduos a considerar a possibilidade de aquisição e utilização de uma bicicleta eléctrica, para as suas deslocações regulares [3 e 4].

A falta de segurança quando se circula no meio do trânsito dada a quase inexistência de vias e infraestruturas próprias, a possibilidade de falta de carga a meio do percurso, a autonomia limitada, a dependência de locais para a carga das baterias, as condições atmosféricas extremas (chuva e frio ou calor excessivo), a inexistência de locais de estacionamento seguros e o preço ainda elevado, para o nível salarial nacional, constituem ainda objecções importantes para uma utilização mais alargada.

A percepção dos novos utilizadores de bicicleta na sociedade mudou em geral, e já não são encarados como os “pobres coitados”, mas antes identificados como os modernos, sofisticados e com uma atitude ecológica activa, pelo que se verificam condições para um crescimento do número de utilizadores. A própria dinâmica de crescimento da comunidade com cada vez maior visibilidade estimulará ainda mais o seu desenvolvimento.

2.3. Equipamentos e soluções disponíveis no mercado

Sendo um exemplo de sucesso em termos de concepção, a bicicleta actual pouco mudou em termos formais desde que surgiu no final do século XIX. A evolução em termos de materiais, processos de fabrico, componentes, tecnologia desempenho e fiabilidade, é impressionante. Mas a bicicleta actual (que era designada na altura como *safety bicycles*) tem partilhado as estradas desde sempre com outros conceitos, de 3 ou mais rodas, com condutores em posição reclinada, etc., sem que o seu domínio tenha sido posto em causa.

A flexibilidade quanto ao tipo de percursos e locais em que pode circular, o custo reduzido, a simplicidade dos seus sistemas mecânicos, o reduzido espaço que ocupa na via pública, tornam a bicicleta como a opção lógica para a maioria das situações, sem que nenhuma outra alternativa tenha sido capaz de a superar.

Mas mesmo este *design* vencedor padece ainda de muitas das limitações originais, nomeadamente a necessidade de uma perícia e sentido de equilíbrio por parte do condutor, e da necessidade de estar em movimento para se poder equilibrar.

A posição de condução, em que o peso corporal fica apoiado numa pequena área do banco é causa de desconforto e problemas de saúde em situações de longos períodos de utilização.

Daí que não seja considerada como opção por uma parte considerável da população, nomeadamente para as faixas etárias mais idosas, para quem a necessidade de actividade física regular é fundamental.

O mercado de *trikes* e bicicletas reclinadas é ainda limitado, mas existem várias marcas que fornecem estes veículos, e esta configuração apresenta muitas vantagens na melhoria do conforto em uso prolongado e em termos aerodinâmicos, dado que a redução na altura os torna mais longos e esguios.

Com o surgimento da nova geração de *kits* e bicicletas eléctricas existem inúmeras opções no mercado, para diferentes valores e níveis de desempenho, mas a limitação de autonomia e a dependência de um local de carga ligado à rede eléctrica tem sido uma preocupação e uma limitação ao seu uso.

Esta busca por novas soluções, que combinam a assistência eléctrica e uma autonomia muito superior tem originado inúmeros projectos pessoais, e algumas iniciativas empresariais por todo o mundo.

Muita da inspiração vem do trabalho que vem vindo a ser realizado pelas inúmeras competições de veículos eléctricos solares (ver Figura 2.4), nomeadamente o “Australian World Solar Challenge” desde 1987 ou o “Hunt-Winston School Solar Car Challenge” iniciado em 1993 [5 e 6].

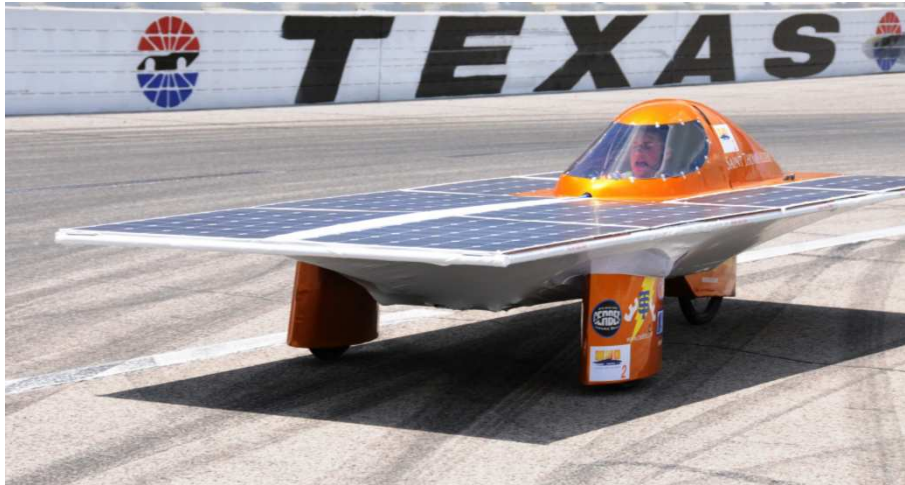


Figura 2.4: Competições de veículos eléctricos [5]

Soluções como atrelados com um kit eléctrico que pode ser acoplado a uma bicicleta, atrelados com painéis solares (ver Figura 2.5 e Figura 2.6), bicicletas com painéis solares e uma profusão de soluções não convencionais (ver Figura 2.7) têm sido criadas e usadas por um número crescente de entusiastas por todo o mundo [7, 8, 9, 10 e 11].



Figura 2.5: *Trike* tandem solar equipado com atrelado [7]

E embora a diversidade de soluções e projectos publicados na *internet*, não há normalmente referências a custos de construção e desenvolvimento, nem dados fidedignos de desempenho, quer em termos de velocidade, quer autonomia.

A informação disponível é útil em termos de exploração de novos conceitos e possibilidades, mas não possibilita qualquer decisão fundamentada, dada a escassez de dados e valores.



Figura 2.6: Arelado com painéis solares [10]

Algumas empresas já apresentam certos conceitos, mas para já, não há indicação de preços de venda ao público, características dos equipamentos ou datas para disponibilidade (ver Figura 2.7)



Figura 2.7: Bicicleta eléctrica equipada com painéis solares [12]

Foram efectuados algumas tentativas de contacto directo, com vista a recolher o máximo de informação e testemunhos em termos de experiência na utilização deste tipo de veículos, mas o pouco retorno não foi significativo no aspecto do desenvolvimento do trabalho.

Existem ainda alguns eventos em que várias equipas competem com veículos a pedal, equipados com painéis solares (ver Figura 2.8 e Figura 2.9).



Figura 2.8: Competição de veículos a pedal solares [13]



Figura 2.9: Veículo da equipa Kensington Centre [14]

No caso do World Solar Cycle Challenge 2001, uma prova com 1.526 km, e 4 classes de veículos e um dos poucos eventos bem documentados, permite reunir alguma informação pertinente, nomeadamente os tempos realizados e distâncias percorridas.

No caso da equipa Kensington Centre (Figura 2.9), que tem uma maior semelhança com o objecto de análise do projecto, a média final foi de cerca de 25 km/h.

A equipa Unitem que corria com uma simples bicicleta equipada com um pequeno painel solar (classe A), atingiu uns impressionantes 41,5 km/h (ver Figura 2.10).

No entanto, a componente de potência humana não poderá ser menosprezada, dado que faziam uma rotação continua na condução pelos vários elementos da equipa (15 no total), e com certeza com valores de potência bem acima dos 75 W considerados no âmbito deste estudo.

<i>final overall results</i>			
<i>team</i>	<i>class</i>	<i>time</i>	<i>total kms</i>
Solar Flare	C2	36hr 32min 20sec	1553
Uniten	A	37hr 22min 55sec	1553
Solar XR2	B	37hr 48min 10sec	1553
Pios	B	40hr 46min 39sec	1553
Quorn	C2	41hr 15min 49sec	1553
Sunstrike	C2	43hr 35min 05sec	1553
Basikal Suria	C1	49hr 55min 23sec	1448
Kensington Centre	B	56hr 04min 53sec	1432
Blue Pelican	C2	61hr 05min 30sec	1347
Sacred Sun	C2	69hr 48min 22sec	1204
Solar Boy	C1	98hr 52min 34sec	326

<i>class winners</i>			
<i>class</i>	<i>winner</i>	<i>time</i>	<i>total kms</i>
A	Uniten	37hr 22min 55sec	1553
B	Solar XR2	37hr 48min 10sec	1553
C1	Basikal Suria	49hr 55min 23sec	1448
C2	Solar Flare	36hr 32min 20sec	1553



Figura 2.10: Classificações finais da prova [14]

3. Veículo de propulsão humana com pedalada assistida e equipado com painel solar fotovoltaico

3.1. Definição das características e especificações do veículo

Sendo o elemento chave do estudo, as características do veículo a desenvolver irão condicionar os resultados finais e respectivas conclusões. Como em qualquer veículo de propulsão humana o factor chave é o peso total, seguido da eficácia mecânica e da resistência aerodinâmica [15, 16, 17, 18 e 19].

O propósito neste projecto foi o de integrar tecnologias, soluções e equipamentos correntes, que permitam a execução e operação num período razoável de tempo, com custos e meios de apoio à produção limitados e não de se orientar para soluções e funcionalidades de topo. Assim, poderiam ser efectuados testes de avaliação sem a necessidade de avultados apoios e financiamentos, servindo de eventuais argumentos para sustentar futuros desenvolvimentos.

Dada a necessidade de uma área de painéis fotovoltaicos considerável, e a sensibilidade a ventos laterais e ao equilíbrio em movimento, uma opção de duas rodas não foi considerada. Por permitir a montagem de um painel de grandes dimensões e por ser naturalmente estável, a opção por uma configuração de 3 rodas, com o condutor em posição reclinada é a mais equilibrada. Com o par de rodas direccionais posicionado na frente, e apenas uma roda motora, esta configuração permite a aplicação de soluções e sistemas comuns da indústria ciclista, sem necessidade de ter suspensão em todas as rodas, nem da instalação de um diferencial no eixo traseiro (em oposição a um veículo de 4 rodas ou a um triciclo com uma roda direccional na frente).

Esta solução permite uma utilização por parte de indivíduos que não tenham a perícia e equilíbrio para controlar uma bicicleta, assim como assegura uma estabilidade extra a baixa velocidade e em estacionamento.

A configuração inicial previa a montagem dos painéis fotovoltaicos lateralmente ao condutor, em posição baixa (ver Figura 3.11), privilegiando a menor sensibilidade aos efeitos de ventos laterais e eventuais perdas de controlo em circulação.

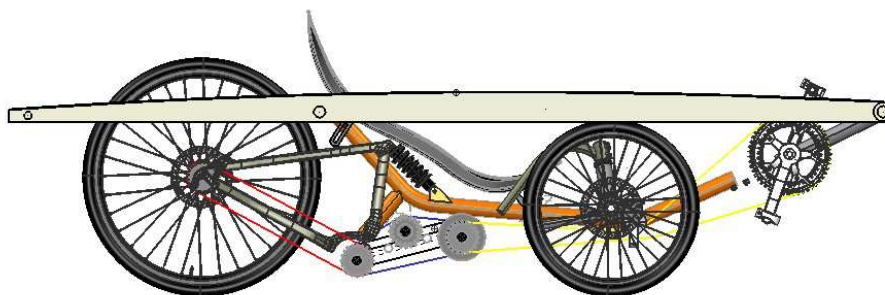


Figura 3.11: Configuração inicial, com painéis montados na lateral

No entanto verificou-se que sem mecanismos complexos (e que implicariam muito peso adicional) de movimentação de um dos painéis, o acesso e saída do veículo seriam inviáveis para a maioria dos potenciais utilizadores.

A opção foi montar os painéis por cima do condutor (ver Figura 3.12 e Figura 3.13), afastando-os até ao limite da largura do veículo de modo a criar um vazio que limite o efeito de sustentação em caso de vento lateral e limite a sensibilidade acrescida desta configuração. Esta solução resolve os problemas de acessibilidade, não é penalizadora em termos de peso, e oferece alguma protecção aos utilizadores para a radiação solar durante os percursos (que serão efectuados de preferência em dias de elevados índices de radiação).

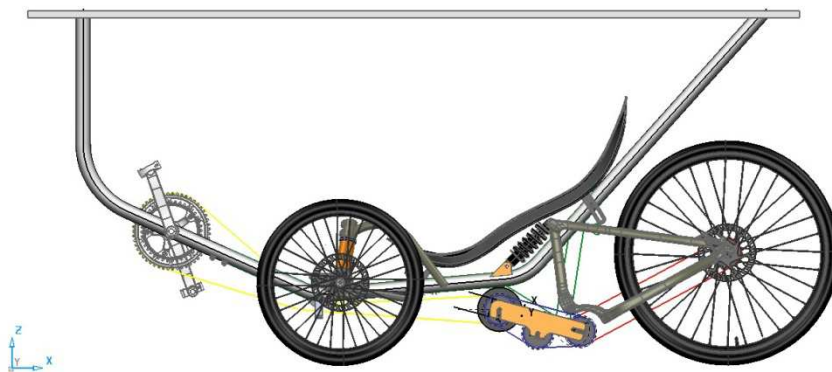


Figura 3.12: Configuração final, com painéis montados no topo



Figura 3.13: Configuração final, com o afastamento entre os painéis

Outro dos requisitos é a utilização de componentes de mercado comuns, sempre que possível, reduzindo ao mínimo o número e complexidade dos componentes a desenvolver e construir para este veículo.

A opção por uma construção do quadro e componentes em aço, em detrimento de ligas leves ou materiais compósitos, onde se poderia reduzir algum peso, foi suportada em considerações de ordem económica e de acesso a meios de produção que permitissem o seu processamento e construção. Além disso, os eventuais ganhos de peso no quadro não seriam significativos em termos de massa final do veículo, pois uma redução de 2 a 3 quilogramas implicaria que o peso final do veículo passaria de valores previstos na ordem dos 42 Kg para cerca de 39 Kg. A influência dos componentes no peso final é demasiado importante, para que a redução de peso apenas no quadro seja significativa.

Outro requisito de segurança imposto é o de que o veículo tenha sempre luzes funcionais, independentemente do estado de carga das baterias do kit eléctrico instalado. A instalação de um cubo de roda com dínamo na corrente (ver Figura 3.14), ligado a um circuito que alimenta uma lâmpada frontal e uma luz de retaguarda, asseguram a visibilidade nocturna ou em condições de visibilidade reduzida, e é um requisito legal em muitos dos países da União Europeia.

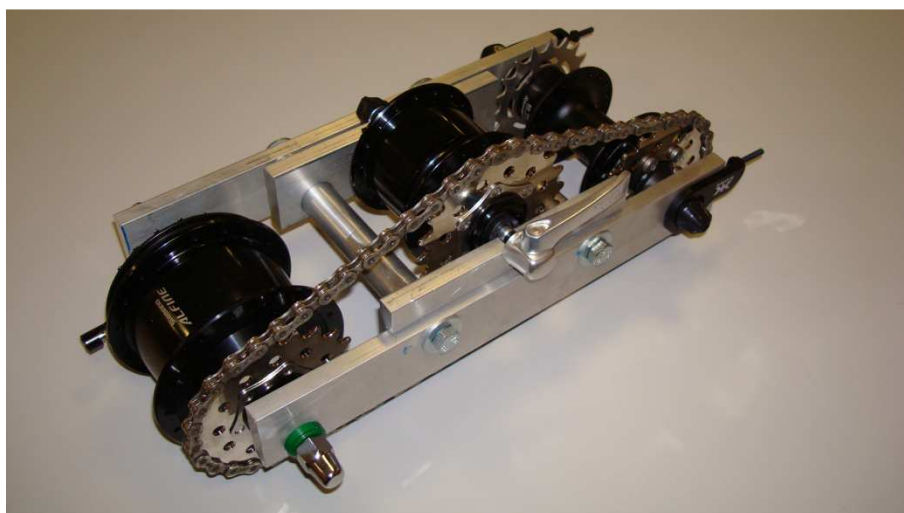


Figura 3.14: Protótipo com o módulo de transmissão com um cubo dínamo integrado

3.2. Pré-selecção de componentes e de sistemas

Os componentes mecânicos (transmissão, travagem e acessórios genéricos de bicicleta) foram baseados nos componentes de gama média utilizados no trabalho anterior do autor, e apenas os sistemas de assistência eléctrica, de painéis fotovoltaicos e de carga da bateria foram alvo de mais atenção.

Existem inúmeras soluções no mercado, mas nenhuma com este tipo de objectivo e funcionalidade.

Os critérios de selecção mais importantes foram o peso, o preço, a disponibilidade e facilidade de acesso e a informação técnica disponível.

Para o kit de assistência eléctrica foram avaliadas várias soluções:

- BionX PL250 HT SL XL e bateria LiFePO4 48V/8,8Ah comercializado pela empresa E-Mobility [20 e 21]
- Kit Rubí XF 350 e bateria LiFe BT 36V/9Ah comercializado pela empresa CicloTek.com [22]
- Kit 36V/250W e bateria LiFePO4 36V/12Ah comercializado pela empresa ecoSpot [23]

A decisão recaiu sobre a solução da BionX, com uma autonomia anunciada de cerca de 100 Km , sendo a apreciação final apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Selecção do kit eléctrico

Vantagens	Limitações
Peso Inferior Autonomia superior Capacidade de carga em circulação Literatura e informação disponível Disponível por diferentes fornecedores	Preço superior

Para o sistema de painéis fotovoltaicos e carregador, as opções são limitadas, dado que a maioria dos equipamentos disponíveis se destina a aplicação fixa, logo sem necessidade de redução de peso. Foram avaliadas duas soluções, em que os painéis não estavam aplicados numa moldura rígida com painel de vidro:

- Painel solar FLEXSP50–L + regulador WRM-15 comercializado pela empresa Solar Future [24, 25, 26 e 27]
- Painel solar flexível 80W + regulador LCD 20A, 12/24V comercializado pela empresa Lensun – Solar Energy (eBay) [28]

A decisão recaiu sobre a solução da Solar Future sendo a apreciação final apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Selecção do sistema fotovoltaico

Vantagens	Limitações
Peso Inferior Literatura e informação disponível Robusto (aplicações navais)	Preço superior

3.3. Experiência anterior em projecto de veículos de propulsão humana

O veículo desenvolvido foi baseado na experiência prévia do autor, que desde 2009 se tem dedicado ao desenvolvimento e construção de triciclos reclinados, tendo finalizado a 3ª versão no início de 2012 (ver Figura 3.15 e Figura 3.24).



Figura 3.15: Trike versão Mk1 (2009)

O trabalho desenvolvido envolveu a construção de um protótipo em madeira para testes ergonómicos (ver Figura 3.16), a digitalização e engenharia inversa de alguns elementos chave, nomeadamente o banco anatómico (proveniente dos trikes Optima, ver Figura 3.17) e o triângulo de suspensão traseiro (ver Figura 3.18 e Figura 3.19).



Figura 3.16: Maqueta em madeira para validação ergonómica (2009)

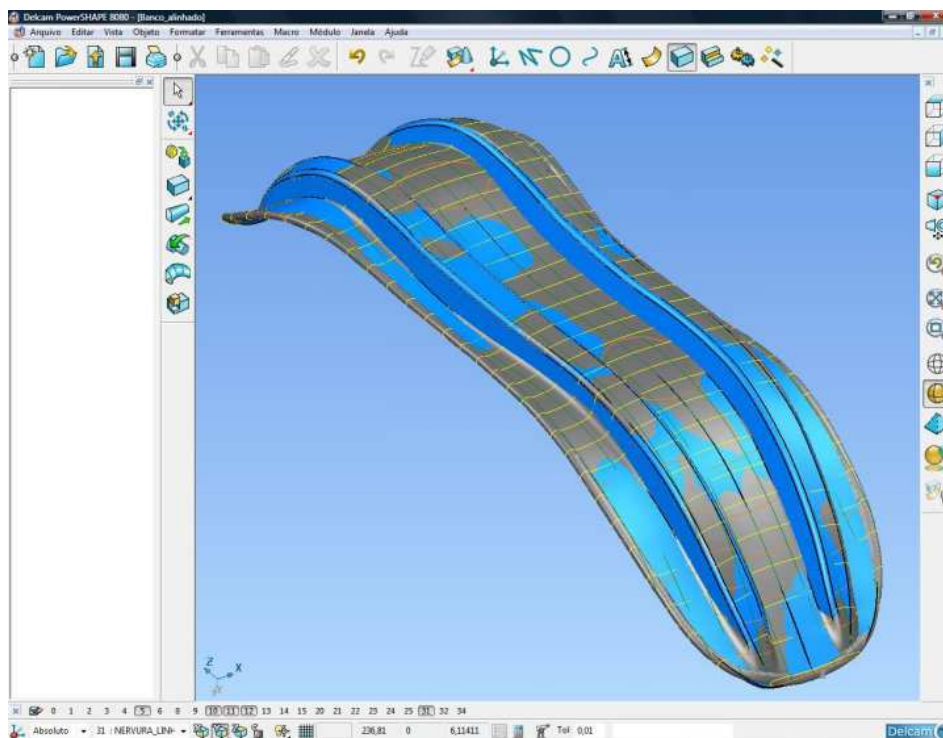


Figura 3.17: Engenharia inversa do banco Optima (2010)



Figura 3.18: Medição de quadro Rockrider 6.3 para determinação da geometria da suspensão (2010)



Figura 3.19: Digitalização do triângulo posterior Rockrider (2011)

Foram ainda construídos moldes de fibra de vidro para replicar o banco Optima, tendo sido obtidos pesos finais semelhantes ao produto original (ver Figura 3.20).



Figura 3.20: Construção de molde e réplicas do banco Optima em fibra de vidro (2011)

Os diferentes componentes foram maquinados e soldados (ver Figura 3.21) sem recurso a qualquer *jig* de soldadura, dado que o investimento nesta ferramenta não seria justificado pela quantidade de quadros a construir (2 unidades), mas foi feita uma inspecção geométrica com recurso a um braço de medição FARO [29] (ver Figura 3.22) . Os desvios detectados foram relativamente reduzidos, com desvios máximos inferiores a 2 mm (ver Figura 3.23) e não afectavam a dinâmica e funcionalidade do veículo e do sistema de direcção.



Figura 3.21: Componentes do Trike Mk III após soldadura (2011)



Figura 3.22: Inspeção e medição do quadro após soldadura (2011)

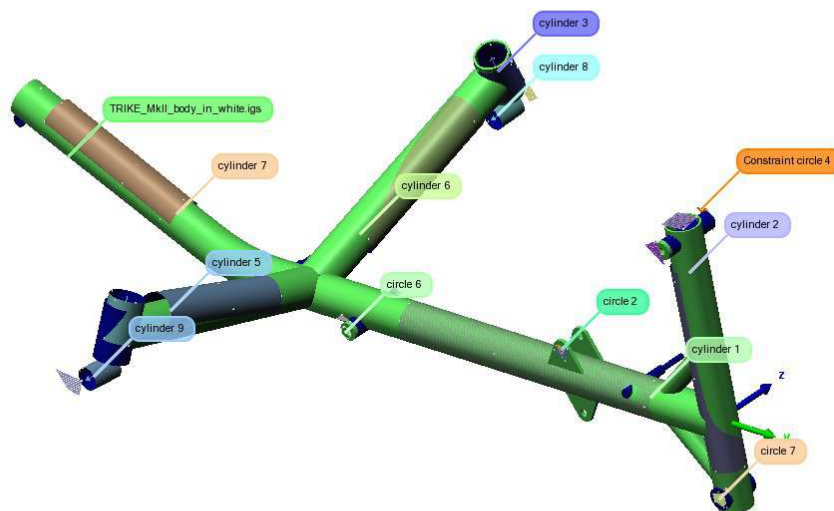


Figura 3.23: Comparação dos elementos medidos com o CAD (2011)



Figura 3.24: Trikes versão Mk II e Mk III (2012)

3.4. Desenvolvimento e modelação 3D do veículo

O trabalho de desenvolvimento e modelação teve como base o modelo 3D elaborado para o *trike* versão MkIII (ver Figura 3.24), sendo efectuadas as adaptações necessárias para a montagem e integração dos novos componentes e funcionalidades.

Não se pretendeu chegar a uma solução refinada e detalhada, mas apenas construir um esboço tridimensional funcional (ver Figura 3.25, Figura 3.28 e Figura 3.29) que permitisse determinar as características dinâmicas significativas (massa total e área frontal).

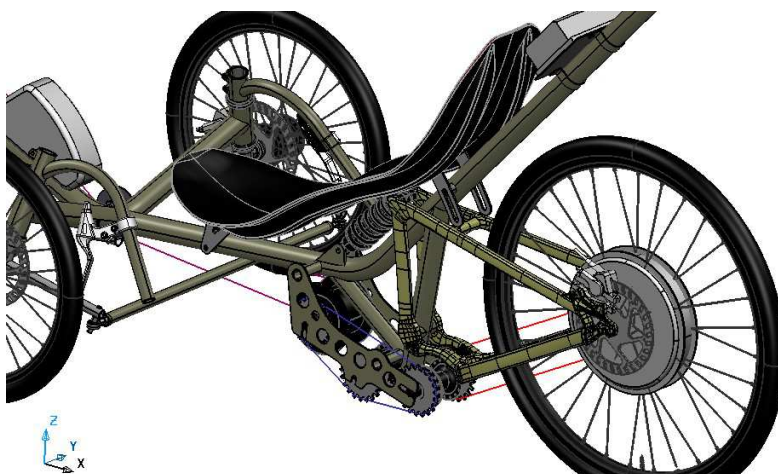


Figura 3.25: Detalhe da traseira do veículo, com o motor eléctrico e triângulo de suspensão traseiro

O trabalho efectuado é um ponto de partida para uma evolução e optimização futura (ver Figura 3.26 e Figura 3.27), tendo mantido algumas das vertentes já ensaiadas nos protótipos anteriores, tais como posição de condução e ergonomia dos comandos, trajectórias da corrente de transmissão e a geometria da direcção com compensação de Ackerman [30].

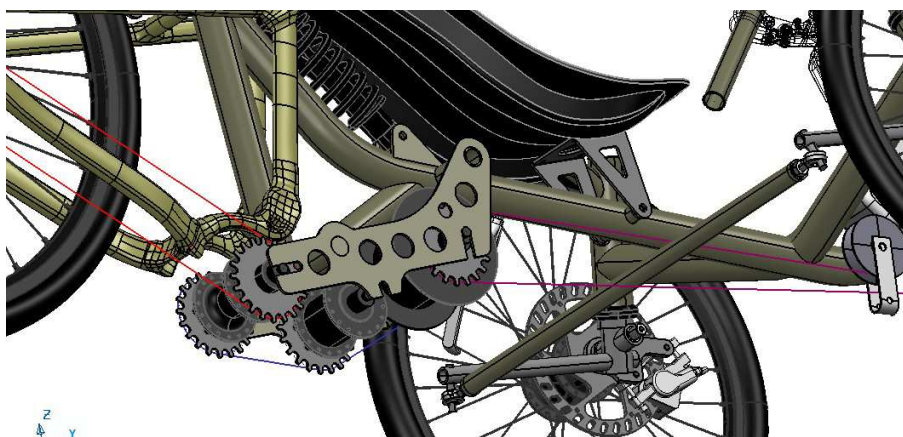


Figura 3.26: Detalhe da traseira do veículo, mostrando o módulo de transmissão e tirante de direcção

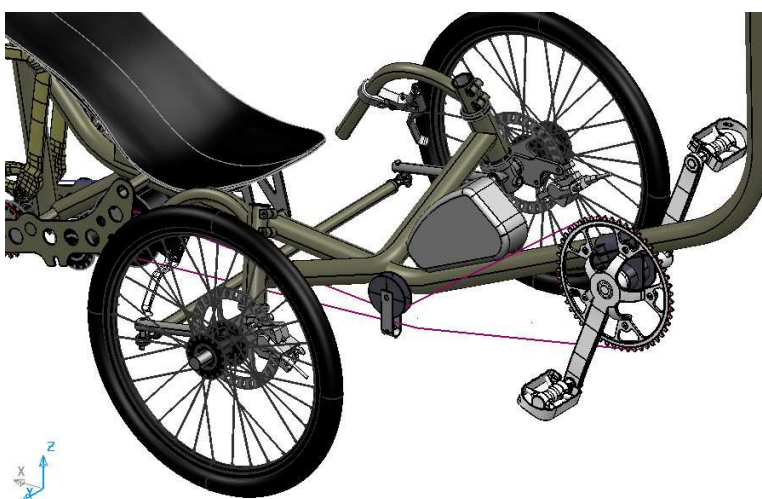


Figura 3.27: Detalhe da dianteira do veículo, mostrando a bateria, e os comandos no guiador

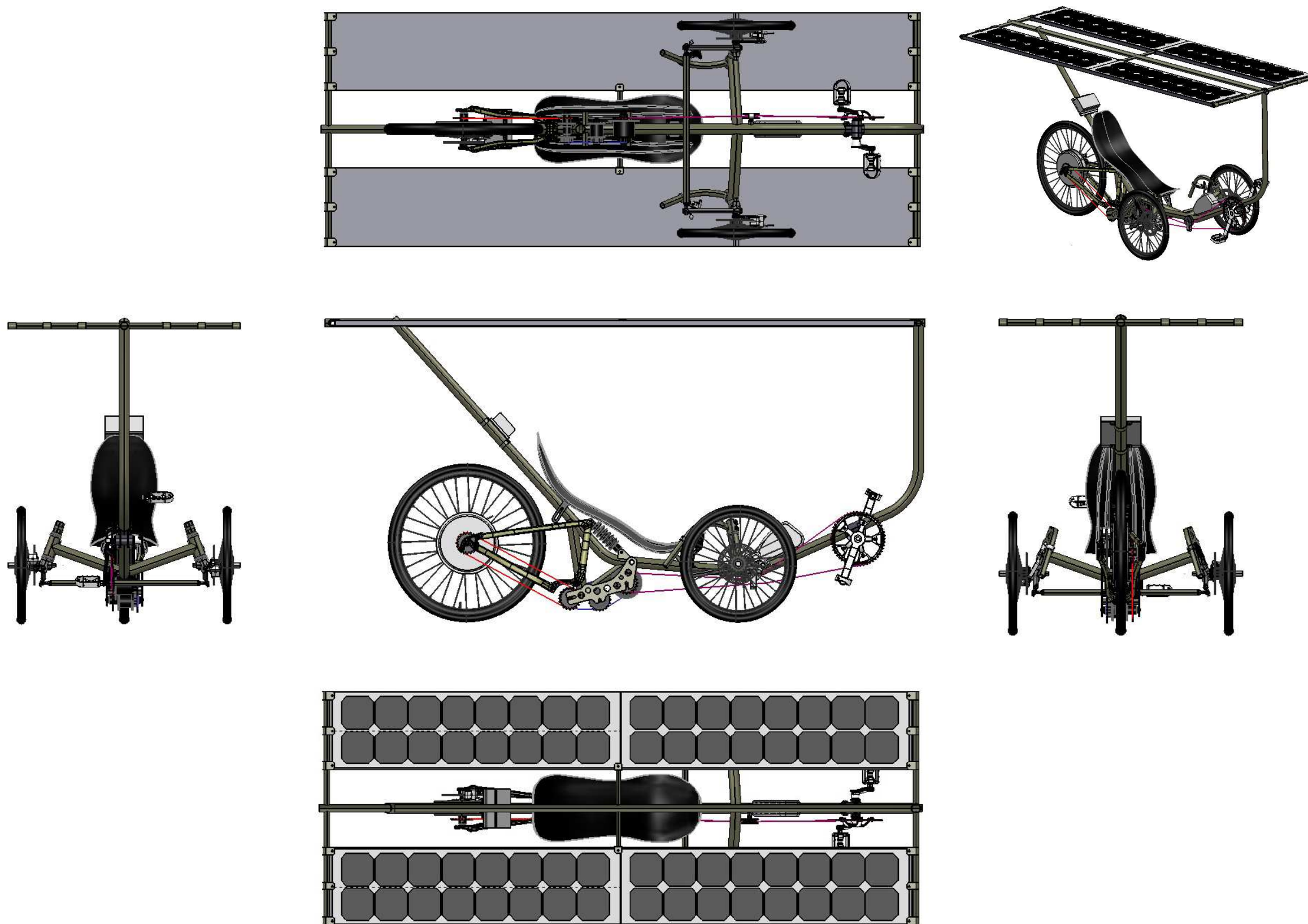


Figura 3.28: Vista do modelo CAD do veículo

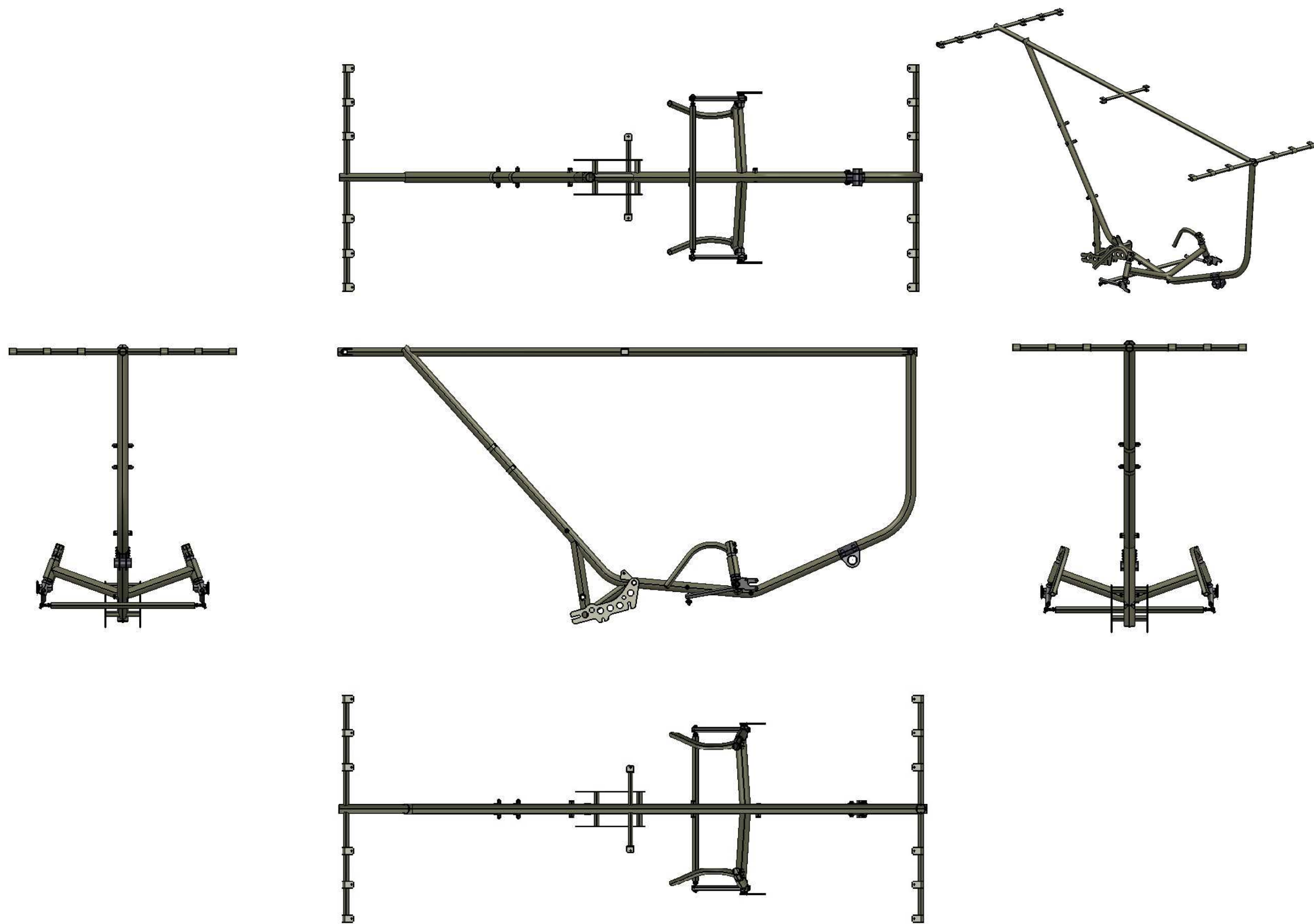


Figura 3.29: Vista do modelo CAD do quadro

Com base neste modelo e na informação disponível sobre os diferentes componentes, foi possível determinar a massa total do veículo (ver Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Peso total do veículo (por componentes)

Componentes	Peso (kg)
Quadro em aço	11,2
Cubos das rodas – <i>kingpin</i> (2x)	1,1
Tirante de direcção e rotulas	0,7
Eixos da rodas da frente	0,8
Caixas de direcção (2x)	0,4
Guiadores (2x)	0,7
<i>e-Kit</i> BionX PL250 HT DL XL	7,3
Painel fotovoltaico FLEXSP50–L (4x)	3,2
Regulador WRM-15	0,6
Painéis <i>sandwich</i> Alustep-FN- 2.240x300x12,7 (x2)	3,8
Banco e ferragens	1,6
Roda traseira (aro, pneu e raios)	1,7
Rodas dianteiras (2x)	2,6
Travões (3 maxilas e 2 manípulos)	0,9
Pedaleiro Alfine + rolamentos	1,0
Corrente + rolete	1,0
Cubo traseiro Alfine 8 Vel + manípulo	1,9
Cubo dianteiro Alfine c/ Dínamo	0,7
Cubo traseiro Deore	0,7
Iluminação (frente + traseira)	0,4
Ferragens e acessórios diversos (aprox.)	0,5
TOTAL (kg)	42,8

4. Caracterização da dinâmica de movimento do veículo

4.1. Determinação dos parâmetros significativos para a caracterização dinâmica do veículo

A expressão que descreve a dinâmica de movimento de um veículo, em que o valor da potência aplicada é dada em função da velocidade e dos diferentes parâmetros que definem o veículo é dada equação 4.1 [31, 32, 33, 34 e 35], em que os parâmetros estão apresentados na

Tabela 4.4.

$$P = C_m * V * \left(C_d * A * \frac{\rho}{2} * (V + W)^2 + F_{rg} + V * C_{rVn} \right) \quad (4.1)$$

O parâmetro F_{rg} , que representa a força de resistência ao rolamento e a componente tangencial do peso total do veículo é dado pela expressão 4.2:

$$F_{rg} = g * (m_{bike} + m_{rider}) * (C_r * \cos(\beta) + \sin(\beta)) \quad (4.2)$$

O parâmetro ρ , que corresponde à densidade do ar, em função dos valores de referência ao nível do mar, é dada por:

$$\rho = \rho_0 * \frac{373}{T} * e^{\left(-\rho_0 * g * \frac{H_m}{P_0} \right)} \quad (4.3)$$

Dado que se pretende determinar o valor da velocidade do veículo, em função dos valores de potência aplicada, teremos:

$$V^3 + V^2 * 2 * \left(W + \frac{C_{rVn}}{C_d * A * \rho} \right) + V * \left(W^2 + \frac{2 * F_{rg}}{C_d * A * \rho} \right) - \frac{2 * P}{C_m * C_d * A * \rho} = 0 \quad (4.4)$$

Para resolver esta equação teremos as seguintes soluções,

Para valores de $a^2 + b^3 \geq 0$:

$$v = \sqrt[3]{a + \sqrt{a^2 + b^3}} + \sqrt[3]{a - \sqrt{a^2 + b^3}} - \frac{2}{3} * \left(W + \frac{C_{rVn}}{C_d * A * \rho} \right) \quad (4.5)$$

Para valores de $a^2 + b^3 < 0$:

$$v = 2 * \sqrt[3]{-b} * \cos \left(\frac{1}{3} * \arccos \left(\frac{a}{\sqrt[3]{-b^3}} \right) \right) - \frac{2}{3} * \left(W + \frac{C_{rVn}}{C_d * A * \rho} \right) \quad (4.6)$$

em que os parâmetros **a** e **b** são dados pelas formulas 4.7 e 4.8:

$$a = \frac{W^3 - C_{rVn}^3}{27} - \frac{W * \left(5 * W * C_{rVn} + \frac{8 * C_{rVn}^2}{C_d * A * \rho} - 6 * F_{r\bar{g}} \right)}{9 * C_d * A * \rho} + \frac{2 * F_{r\bar{g}} * C_{rVn}}{3 * (C_d * A * \rho)^2} + \frac{p}{C_m * C_d * A * \rho} \quad (4.7)$$

$$b = \frac{2}{9 * C_d * A * \rho} * \left(3 * F_{r\bar{g}} - 4 * W * C_{rVn} - W^2 * C_d * A * \frac{\rho}{2} - \frac{2 * C_{rVn}}{C_d * A * \rho} \right) \quad (4.8)$$

As variáveis em questão e alguns valores de referência estão discriminadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Descrição das variáveis das equações da dinâmica do veículo

Parâmetro (unidades)	Valores de referência [36, 37 e 38]	Designação da variável
P (W)		Potência motriz total
V (m/s)		Velocidade do veículo
W (m/s)		Velocidade frontal do vento
H_{nn} (m)		Altitude acima do nível do mar
T (° K)		Temperatura do ar
Declive (%)		Inclinação da estrada, em percentagem
β (°)		Ângulo de inclinação = arctan(Declive/100)
m_{bike} (kg)		Massa do veículo
m_{rider} (kg)		Massa do condutor
C_d		Coeficiente de arrasto aerodinâmico
A (m ²)		Área frontal total (veículo + condutor)
C_r	(entre 0.0025 e 0.008)	Coeficiente de resistência ao rolamento
C_{rV}	(0,1)	Coeficiente dinâmico de resistência ao rolamento, dependente da velocidade do veículo
C_{rVn}	(entre 1.03 e 1.09)	Componente normal do coeficiente dinâmico de resistência ao rolamento ; $C_{rVn} = C_{rV} \cdot \cos(\beta)$
C_m		Coeficiente de perdas mecânicas e de transmissão de potência
ρ (kg/m ³)		massa específica do ar
ρ₀ (kg/m ³)	1.293 kg/m ³	massa específica do ar ao nível do mar a 0° Celsius
p₀ (Pa)	101.325 Pa	Pressão do ar ao nível do mar a 0° Celsius
G (m/s ²)	9,8 m/s ²	Aceleração da gravidade
F_{rg} (N)		Força resistente

4.1.1. Potência motriz – P

O valor de potência motriz aplicada é composta por duas componentes, a originária do esforço do condutor (**P_{Hum}**) e a componente que é gerada no motor elétrico.

A componente humana é o parâmetro mais difícil de simular e estimar, dado que dependerá, não só do indivíduo, mas também do seu estado de espírito e das condições ambientais instantâneas durante o percurso.

Os valores de potência motriz humana **P_{Hum}** considerados para efeitos de análise neste trabalho, e por uma questão de simplificação, serão dependentes do valor do declive na estrada e da velocidade do vento, tendo por base um valor de referência.

O valor de referência foi baseado na intensidade de esforço e potência que um humano adulto médio consegue gerar de modo continuado por longos períodos de tempo. O gráfico da Figura 4.30, baseado em estudos da NASA indica que este valor ronda os 75 W [39 e 40].

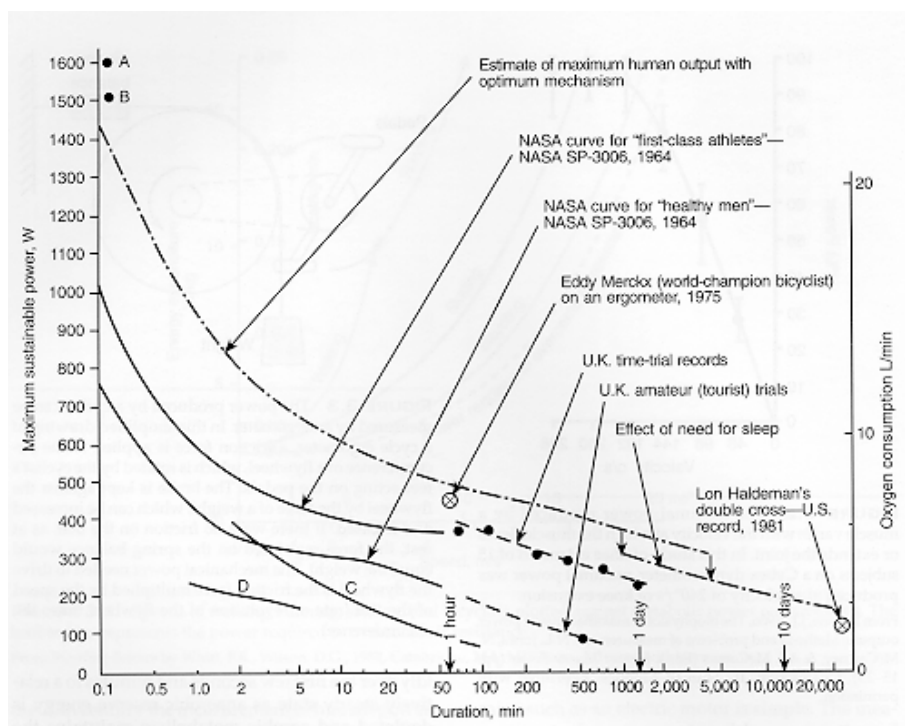


Figura 4.30: Valores de potência sustentável para humanos [40]

Este valor será majorado ou minorado de acordo com o desnível da estrada, o que será uma aproximação razoável para o comportamento típico de um ciclista (ver Tabela 4.5). No caso do valor da componente da velocidade do vento ao longo do trecho ser superior a um valor crítico (W_{Vcrit}), então este valor também será incrementado.

Tabela 4.5 – Valores assumidos de potência humana aplicada

Declive	Potência Humana (P_{Hum})
< -5%	25 W
Entre -5% a -2%	50 W
Entre -2% a 2%	75 W
Entre 2% a 5%	100 W
> 5%	125 W
Para valores de $W_{Vcrit} > 20$ Km/h	+ 25 W

O valores máximos são muito superiores ao valor de referência, mas ainda dentro da gama definida no gráfico da Figura 4.30.

Os valores de assistência eléctrica, apresentados na Tabela 4.6 são também dados em função do declive no troço do percurso, de acordo com os diferentes modo no controlador BionX [21], de modo a poupar a carga da bateria em descida ou plano, e dando uma assistência eléctrica mais significativa para declives maiores.

Tabela 4.6 – Valores assumidos de potência eléctrica assistida

Declive	Assistência eléctrica (P_{Elec})
< -5%	0%
Entre -5% a -2%	+ 75 %
Entre -2% a 2%	+ 150%
Entre 2% a 5%	+ 150%
> 5%	+ 300%

4.1.2. Velocidade do vento frontal - W

Este parâmetro é fundamental dado que varia em cada troço de acordo com a direcção do percurso, sendo obtido pela projecção do vector V_{W0} , velocidade do vento ao nível do solo (direcção e norma) sobre o vector velocidade V no troço respectivo.

Esta componente corresponde ao efeito real de arrasto/impulsão provocado no veículo, não sendo tida em conta a componente lateral.

Dada a dificuldade em determinar a velocidade do vento em cada local/troço, optou-se por assumir que seria uniforme em todo o percurso e baseada em dados de previsão meteorológica. Uma vez que os valores de vento são referentes à altura em que os sensores captam, bem acima do nível do solo [41 e 42], temos.

$$V_{W0} = V_{Wmeteo} \left(\frac{Z_0}{Z_{meteo}} \right)^p \quad (4.9)$$

Em que a expoente p considerada neste estudo é de 0,15, correspondente a perfis verticais de vento em zona rural e condições de classe de estabilidade D (numa escala de A a F) [43], e a altitude de referência da previsão meteorológica é de 50 metros.

4.2. Caracterização dos troços de um percurso obtido com recurso a um receptor GPS

O ficheiro de dados proveniente de um GPS (designado por *track* ou percurso) apresenta os valores de latitude (Lat), longitude (Long, em graus) e altitude (H_{nn} , em metros ou pés) para o início e fim de cada troço [44].

Para o estudo são necessários o comprimento (ΔL), o declive, a altitude e a direcção relativa ao Norte de cada troço.

Para tal, será considerado que a Terra se aproxima a uma esfera perfeita com um raio **R** de 6.371.000 metros.

As equações que nos permitem obter o comprimento de cada troço na tabela de cálculo relativamente a pontos genéricos **Pt1** E **Pt2** é dada por:

$$\Delta L_{1,2} = \text{acos}(\text{sen}(\text{Lat}_{Pt1}) \cdot \text{sen}(\text{Lat}_{Pt2}) + \text{cos}(\text{Lat}_{Pt1}) \cdot \text{cos}(\text{Lat}_{Pt2}) \cdot \text{cos}(\text{Long}_{Pt2} - \text{Long}_{Pt1})) \cdot R \quad (4.10)$$

Para a orientação relativa ao Norte, temos:

$$H_{V1,2} = \text{atan}(\text{sen}(\text{Long}_{Pt2} - \text{Long}_{Pt1}) \cdot \text{cos}(\text{Lat}_{Pt2}) \cdot \text{cos}(\text{Lat}_{Pt1}) \cdot \text{sen}(\text{Lat}_{Pt2}) - \text{sen}(\text{Lat}_{Pt1}) \cdot \text{cos}(\text{Lat}_{Pt2}) \cdot \text{cos}(\text{Long}_{Pt2} - \text{Long}_{Pt1})) \quad (4.11)$$

O declive é dado por:

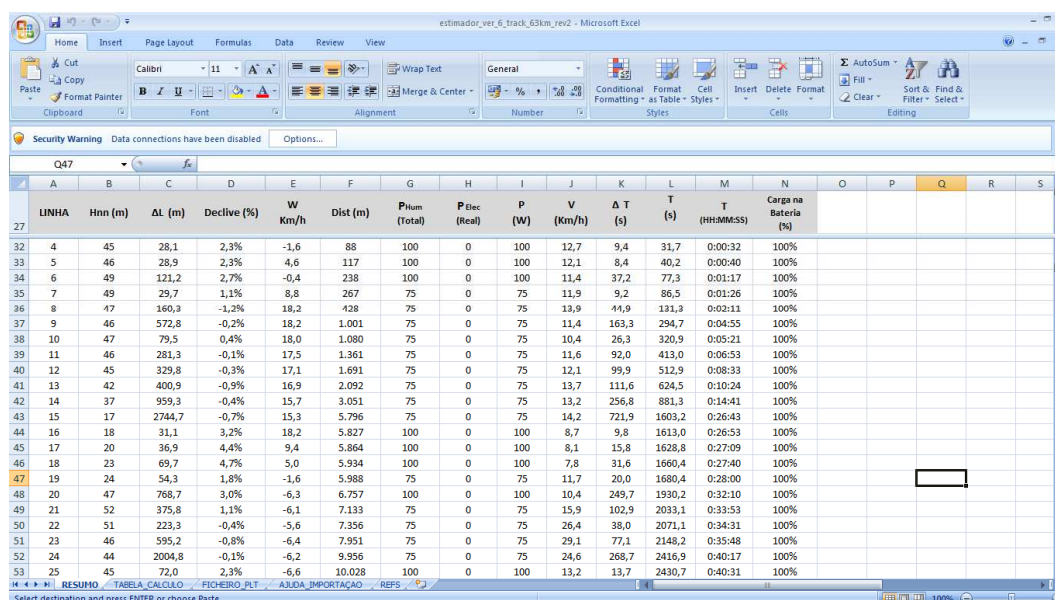
$$\text{Declive} = \frac{(H_{n2} - H_{n1})}{\Delta L_{1,2}} \quad (4.12)$$

4.3. Estimador de percursos – implementação em suporte informático

O estimador foi implementado numa folha de calculo do MS Excel, dada a facilidade de implementação de todos os cálculos e testes lógicos num contexto gráfico. A opção por programação tradicional teria tornado o desenvolvimento e revisão mais morosas.

Em termos de estrutura, de modo a organizar e manipular todos os dados, foram criados 4 separadores principais.

RESUMO – Neste separador (ver Figura 4.31) é apresentado em tabela o resumo dos dados mais significativos que descrevem a dinâmica do percurso.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	LINHA	Hnn (m)	ΔL (m)	Declive (%)	W Km/h	Dist (m)	Psum (Total)	Pdec (Real)	P (W)	V (Km/h)	ΔT (s)	T (s)	T (HH:MM:SS)	Carga na Bateria (%)					
32	4	45	28,1	2,3%	-1,6	88	100	0	100	12,7	9,4	31,7	0:00:32	100%					
33	5	46	28,9	2,3%	4,6	117	100	0	100	12,1	8,4	40,2	0:00:40	100%					
34	6	49	121,2	2,7%	-0,4	238	100	0	100	11,4	37,2	77,3	0:01:17	100%					
35	7	49	29,7	1,1%	8,8	267	75	0	75	11,9	9,2	86,5	0:01:26	100%					
36	8	47	160,3	-1,2%	18,2	428	75	0	75	13,9	44,9	131,3	0:02:11	100%					
37	9	46	572,8	-0,2%	18,2	1.001	75	0	75	11,4	163,3	294,7	0:04:55	100%					
38	10	47	79,5	0,4%	18,0	1.080	75	0	75	10,4	26,3	320,9	0:05:21	100%					
39	11	46	281,3	-0,1%	17,5	1.361	75	0	75	11,6	92,0	413,0	0:06:53	100%					
40	12	45	329,8	-0,3%	17,1	1.691	75	0	75	12,1	99,9	512,9	0:08:33	100%					
41	13	42	400,9	-0,9%	16,9	2.092	75	0	75	13,7	111,6	624,5	0:10:24	100%					
42	14	37	959,3	-0,4%	15,7	3.051	75	0	75	13,2	256,8	881,3	0:14:41	100%					
43	15	17	2744,7	-0,7%	15,3	5.796	75	0	75	14,2	721,9	1603,2	0:26:43	100%					
44	16	18	31,1	3,2%	18,2	5.827	100	0	100	8,7	9,8	1613,0	0:26:53	100%					
45	17	20	36,9	4,4%	9,4	5.864	100	0	100	8,1	15,8	1628,8	0:27:09	100%					
46	18	23	69,7	4,7%	5,0	5.934	100	0	100	7,8	31,6	1660,4	0:27:40	100%					
47	19	24	54,3	1,8%	-1,6	5.988	75	0	75	11,7	20,0	1680,4	0:28:00	100%					
48	20	47	768,7	3,0%	-6,3	6.757	100	0	100	10,4	249,7	1930,2	0:32:10	100%					
49	21	52	375,8	1,1%	-6,1	7.133	75	0	75	15,9	102,9	2033,1	0:33:53	100%					
50	22	51	223,3	-0,4%	-5,6	7.356	75	0	75	26,4	38,0	2071,1	0:34:31	100%					
51	23	46	595,2	-0,8%	-6,4	7.951	75	0	75	29,1	77,1	2148,2	0:35:48	100%					
52	24	44	2004,8	-0,1%	-6,2	9.956	75	0	75	24,6	268,7	2416,9	0:40:17	100%					
53	25	45	72,0	2,3%	-6,6	10.028	100	0	100	13,2	13,7	2430,7	0:40:31	100%					

Figura 4.31: Aspecto geral do separador RESUMO

TABELA_CALCULO – Neste separador são efectuados todos os cálculos (ver Figura 4.32), com base na informação importada de um ficheiro .PLT, [45], e nos dados significativos relativos aos veículos e condições ambientais. Estes dados são apresentados num cabeçalho, e por uma questão de facilitar a modificação das condições de ensaio, os dados sujeitos a alteração mais comum estão em vermelho, e todas as células que entram nos cálculos estão com fundo cinza.

O diagrama apresentado na Figura 4.33 descreve a sequência de cálculos efectuados, as relações entre as variáveis de entrada e os diferentes resultados obtidos.

No separador TABELA_DE_CALCULO, os diferentes cálculos são feitos linha a linha, em que os dados de cálculo em cada tabela podem ser da linha anterior, do cabeçalho com os parâmetros gerais ou directamente do separador com os dados importados.

Inicialmente são determinadas as características do troço (distância, desnível, orientação, declive, vento frontal), em seguida são determinados os valores de potência em função do declive, e é verificado o estado de carga da bateria, para validar a capacidade de assistência eléctrica.

Com base nestes dados, é determinada a velocidade de acordo com as fórmulas, fazendo uma verificação ao valor de velocidade de modo a não ultrapassar a velocidade limite de assistência do *kit*. Caso seja superior, verifica-se qual a potência necessária para assegurar que o veículo mantenha uma velocidade próxima de modo a manter a assistência.

Finalmente são contabilizados os consumos de energia, ganhos de carga no painel solar e actualizada a capacidade restante na bateria.

Figura 4.32: Aspecto geral do separador CALCULO

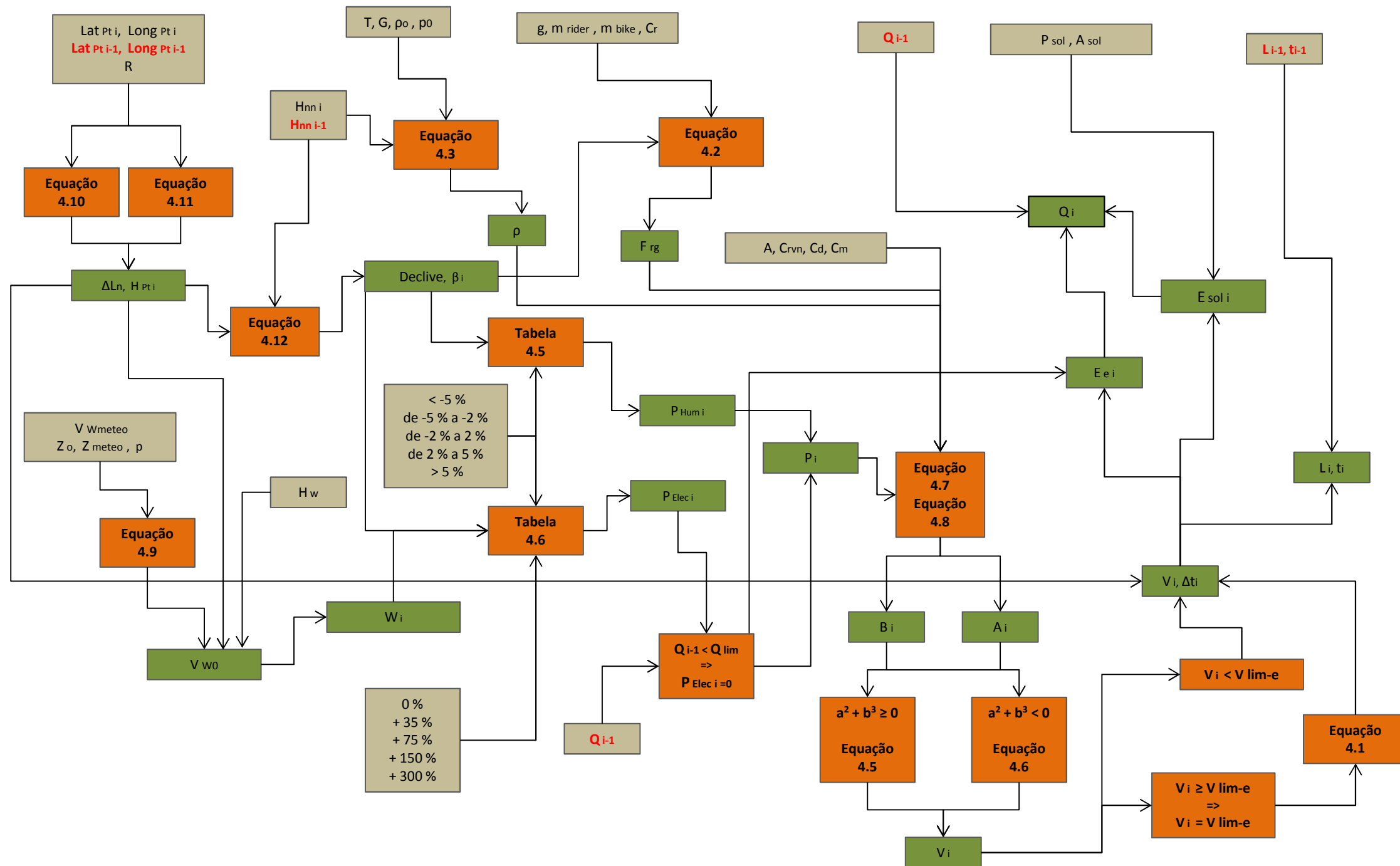


Figura 4.33: Diagrama de cálculos no Estimador de Percursos

FICHEIRO_PLT – Neste separador (ver Figura 4.34) é efectuada a importação de dados de um ficheiro externo, de formato .PLT (originário do software OZI-Explorer), e adequadamente estruturados em termos de linhas e colunas.

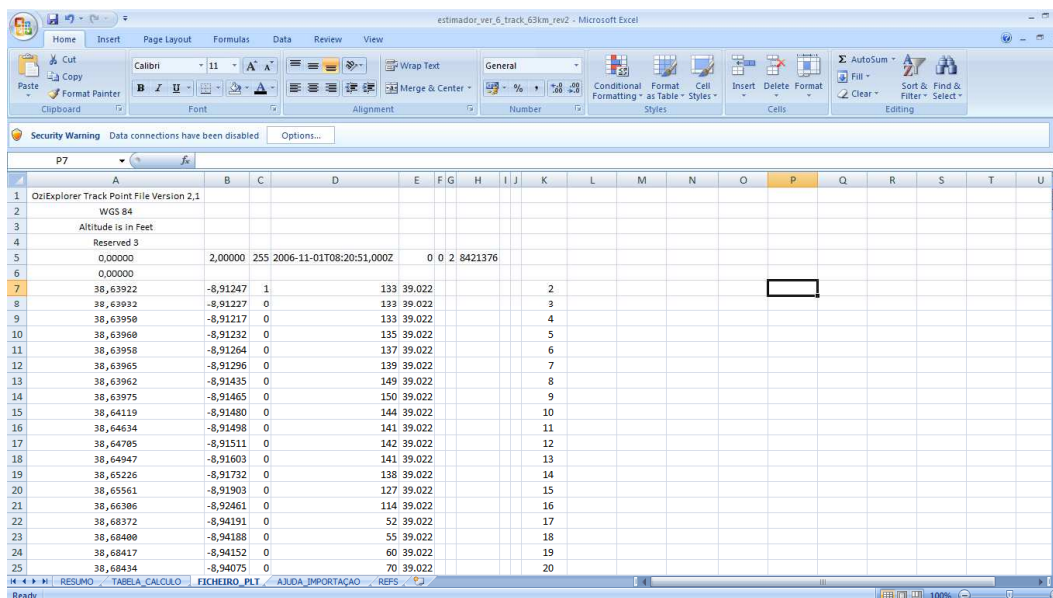


Figura 4.34: Aspecto geral do separador FICHEIRO_PLT

AJUDA_IMPORTACAO – Neste separador são apresentados os passos necessários a uma correcta importação do ficheiro, sem a qual não será possível realizar os cálculos correctamente (ver Figura 4.35).

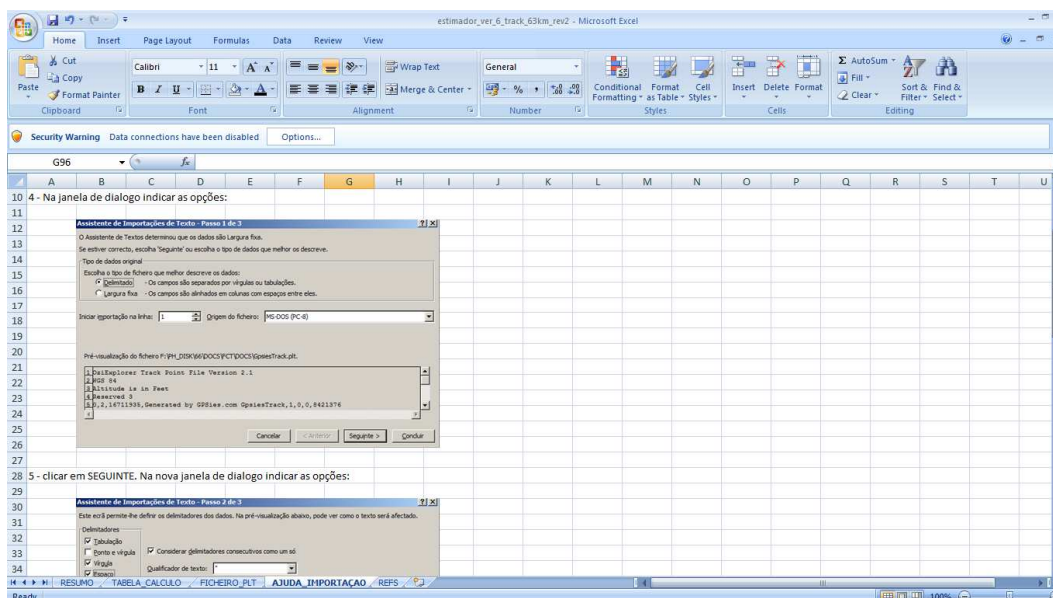


Figura 4.35: Aspecto geral do separador AJUDA_IMPORTACAO

5. Testes e validação do Estimador de Percursos

5.1. Avaliação dos meios disponíveis para os testes

Sendo o propósito do Estimador de Percursos o possibilitar a comparação teórica de diferentes configurações de veículos em condições idênticas e não uma determinação exacta das características dinâmicas de um veículo a pedal num dado percurso, também a sua validação é limitada a verificar se os valores obtidos são semelhantes e coerentes com os obtidos por vias alternativas.

Apesar dos inúmeros contactos efectuados no início do trabalho a diferentes entidades e empresas, não foi possível ter disponível um leque alargado de veículos para efectuar os testes, pelo que infelizmente, apenas o equipamento pessoal do autor da dissertação pôde ser utilizado.

Assim, foi utilizada uma bicicleta de estrada Cube Lightning (ver Fig. 5.35) de 2001, equipada de um sensor de potência Polar (ver Fig. 5.36) de 1ª geração e o respectivo monitor S725X, e na qual foi instalado um GPS Meridian Gold (ver Fig. 5.37) para recolha de dados de percurso, e um nível de bolha ($+20^{\circ}/-20^{\circ}$) para uma verificação da inclinação instantânea.



Figura 5.36: Bicicleta Cube Lightning 2001 utilizada nos testes



Figura 5.37: Sensor de potência Polar



Figura 5.38: Equipamento de monitorização do percurso : monitor Polar S725X, GPS Magellan e nível de bolha

Para a pesagem dos atletas foi utilizada uma balança doméstica, e para a bicicleta foi usada uma pequena balança para bagagem.

Os dados relativos ao vento na altura do teste foram recolhidos no *site* www.windguru.com [46], e referentes à península de Tróia, (a cerca de 20 km do local do teste), dado que não se encontraram valores específicos para esse local.

5.2. Definição dos testes e respectiva metodologia

Foram definidos dois testes, usando o mesmo percurso, mas origens de dados distintas. No primeiro, foram usados os dados obtidos de cada troço do percurso GPS, e simulados individualmente usando o estimador *online* www.kreuzotter.de [31], no segundo, foram feitos testes reais em que se percorreu o percurso, e foram recolhidos dados para comparação com os valores determinados pelo estimador.

O percurso escolhido tem cerca de 20 km, em circuito, com bom piso, e geralmente com pouco trânsito (ver Figura 5.39). Não é particularmente acidentado, mas tem algumas inclinações que levam a alterações nos valores de potência do ciclista.

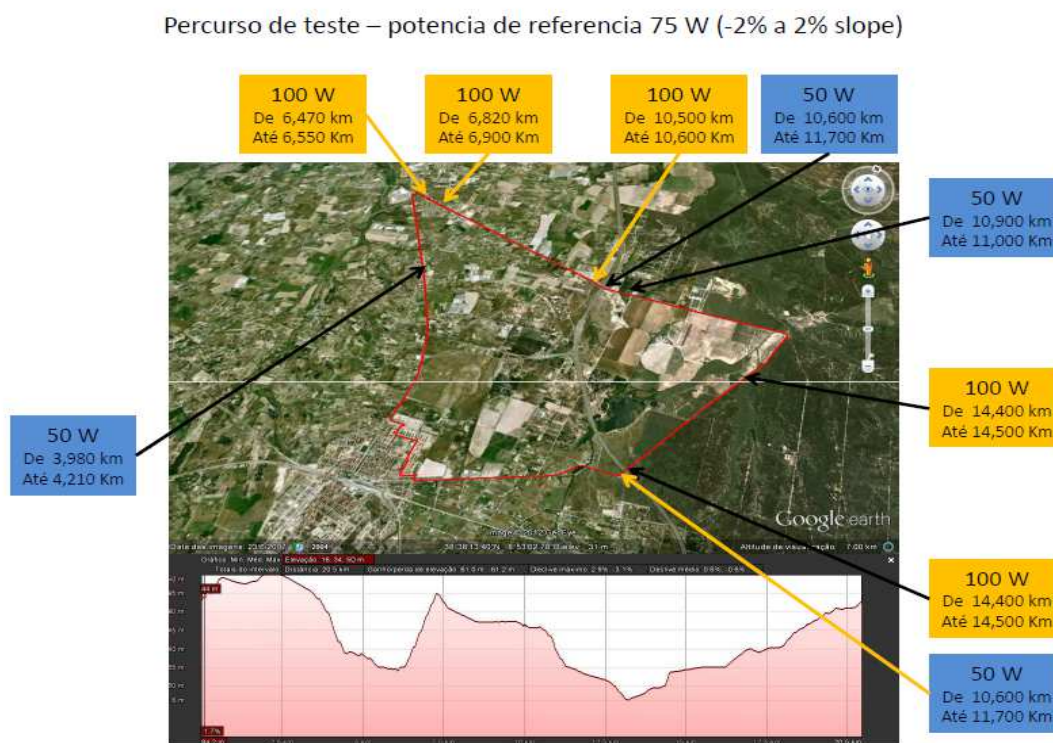


Figura 5.39: Itinerário do percurso utilizado para apoio do ciclista

5.3. Resultados dos testes

5.3.1. Comparação com o Estimador Kreuzotter

O estimador disponível no site www.kreuzotter.de foi uma das referências principais para a elaboração do Estimador de Percursos, pelo que surge como a fonte mais adequada para esta comparação [31].

Para cada um dos troços lineares do percurso GPS foram introduzidos os valores de potência, inclinação e velocidade do vento, e recolhido o valor da velocidade.

Estes foram comparados com os valores determinados pelo Estimador de Percursos, e determinado o erro (ver Figura 5.40).

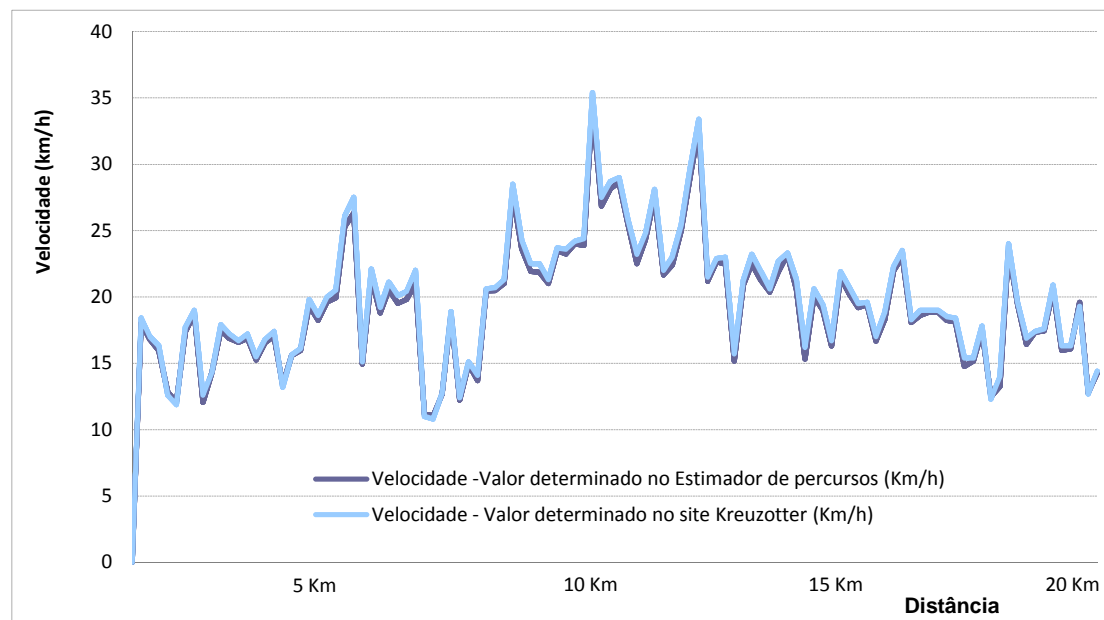


Figura 5.40: Comparação dos valores de velocidade determinadas pelo estimador de percursos e o site Kreuzotter

Os valores foram compilados e em termos de desvios andaram com diferenças médias para cada troço de cerca de 2%.

Com os dados obtidos a diferença entre a duração de um percurso de 20 km foi inferior a 68 segundos (1:02:22 horas para o Estimador de Percursos e 1:01:14 horas para o site Kreuzotter).

5.3.2. Comparação com testes reais

Foram realizados dois testes ao percurso, com ciclistas diferentes, em dias diferentes e com condições meteorológicas diferentes (ver Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Condições dos testes reais

24 de Maio de 2012 – 20:00		27 de Maio de 2012 – 18:40	
Ciclista:	Alexandre Paris	Ciclista:	Pedro Homem
Peso ciclista:	70,8 kg	Peso ciclista:	80,4 kg
Peso bicicleta :	9,69 kg	Peso bicicleta :	9,15 kg
Velocidade vento:	17 km/h	Velocidade vento:	23 km/h
Direcção do vento:	315°	Direcção do vento:	345°
Temperatura:	19° C	Temperatura:	20° C

Foi entregue o itinerário do percurso, que indicava as zonas de alteração de potência, indicando a posição de início e de fim de cada um destes intervalos, assim como o valor a aplicar.

Para a estimativa foram utilizados os parâmetros comuns indicados na Tabela 5.8.

Os tempos obtidos e as diferenças para os valores estimados estão indicados na Tabela 5.9. Os registos dos valores de potência e de velocidade ao longo do percurso estão representados em gráficos, nas Figuras 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44.

Tabela 5.8 – Parâmetros comuns utilizados

Coeficiente aerodinâmico	1,2
Área frontal total	0,5 m ²
Coeficiente de resistência de rolamento	0,0035
Coeficiente de resistência (dependente da velocidade)	0,1
Coeficiente de perdas de transmissão de potência	1,05

Tabela 5.9 – Resumo dos resultados

	24 de Maio de 2012 – 20:00	27 de Maio de 2012 – 8:40
Estimador de Percursos	1:06:26 (3.986 s)	1:07:59 (4.078 s)
Teste real	1:09:30 (4.170 s)	1:09:30 (4.170 s)
Diferença (s)	184	68
Diferença (%)	4,4%	1,6%

Os resultados obtidos durante o teste efectuado no dia 24 de Maio de 2012 são apresentados nos gráficos das Figuras 5.41 e 5.42.

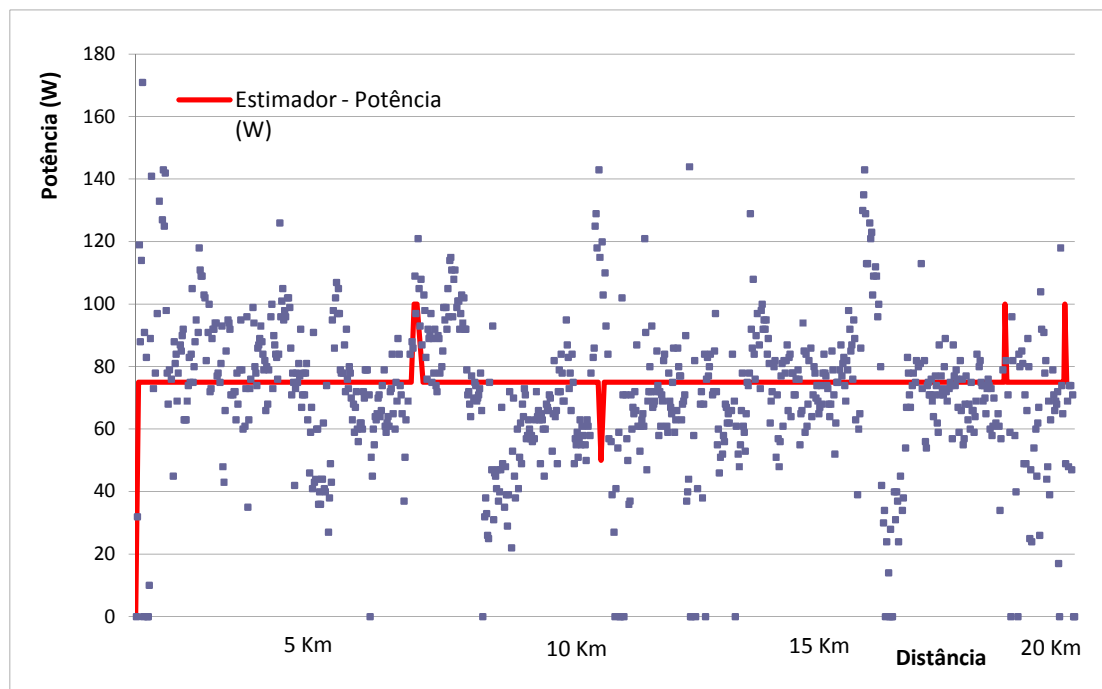


Figura 5.41: Teste de 24/5/12 - Comparação de valores de potência

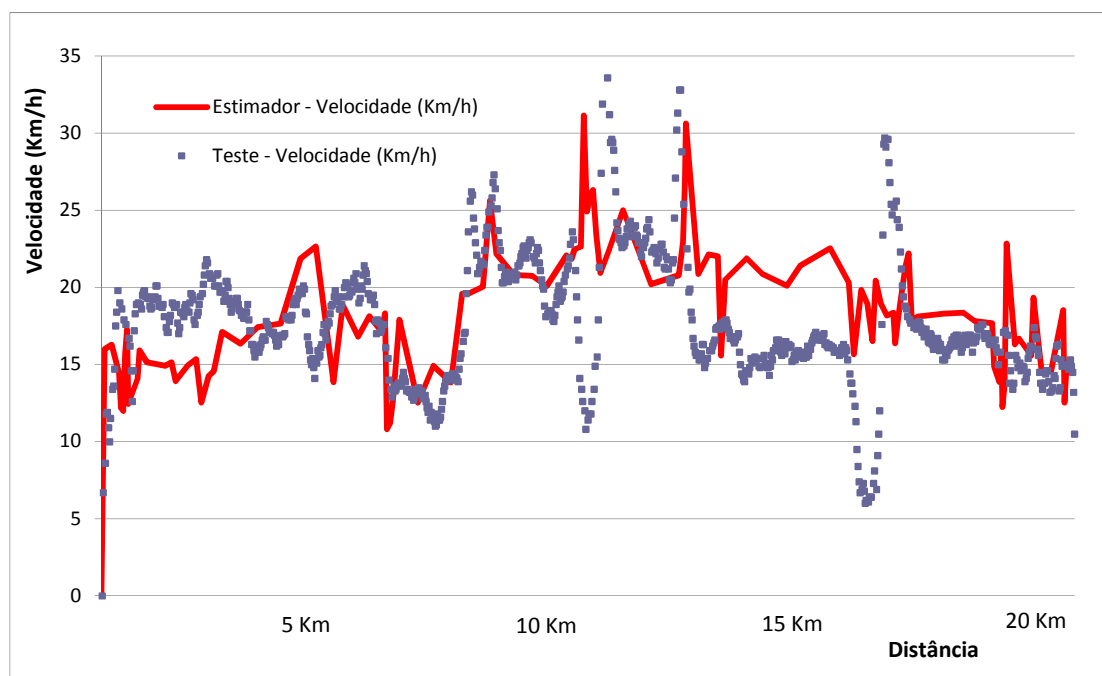


Figura 5.42: Teste de 24/5/12 - Comparação de valores de velocidade

Os resultados obtidos durante o teste efectuado no dia 27 de Maio de 2012 são apresentados nos gráficos das Figuras 5.43 e 5.44.

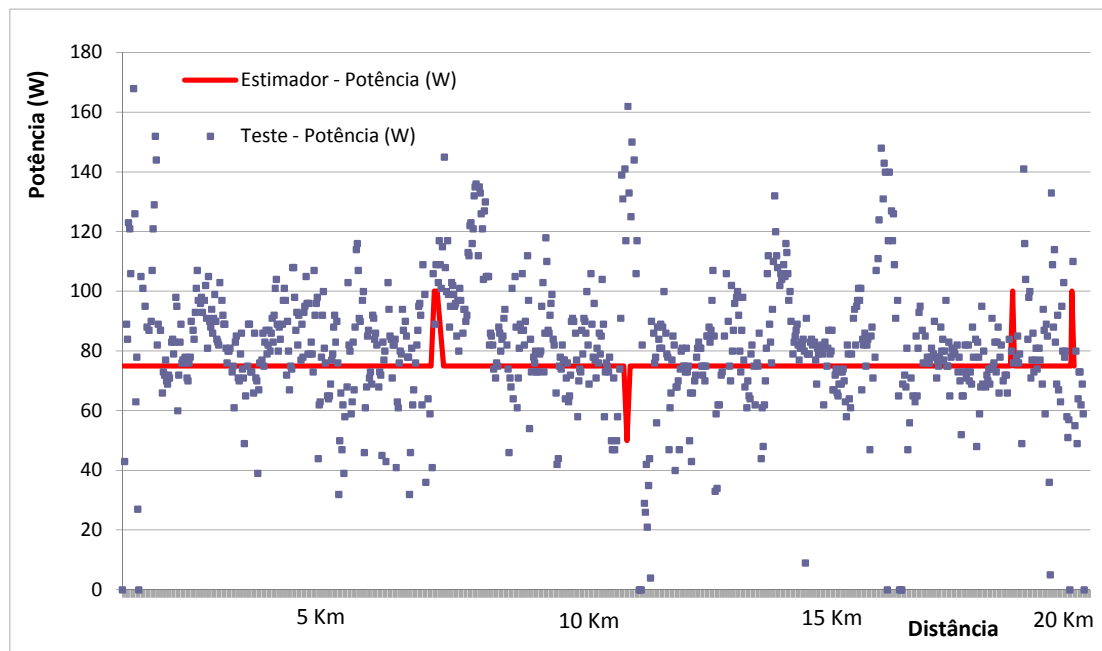


Figura 5.43: Teste de 27/5/12 - Comparação de valores de potência

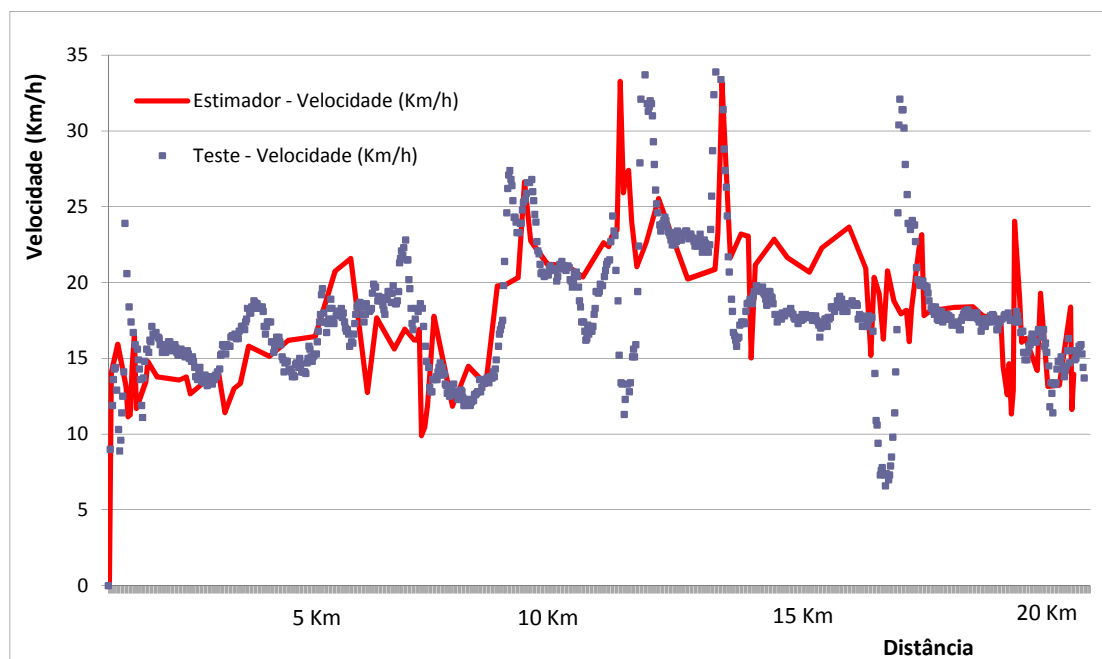


Figura 5.44: Teste de 27/7/12 - Comparação de valores de velocidade

5.4. Testes complementares

Estavam previstos alguns testes complementares, especificamente virados para o desempenho dos *kits* eléctricos, que visavam avaliar a assistência eléctrica real, face aos valores divulgados pelos fabricantes.

Para tal esteve disponível um rolo de treino Tacx i-Magic, que permite também simular percursos originados em *tracks* GPS, mas que nesta fase permitiria comparar os valores de potência aplicados no pedal (dados adquiridos pelo sensor de potência Polar), e os valores de potência na roda pelos dados recolhidos no software TTS 2 (ver Figuras 5.45 e 5.46).



Figura 5.45: Rolo de treino Tacx i-Magic

Esta aplicação permite exportar os dados recolhidos no formato HRM (nativo da Polar) [47], pelo que a comparação e análise dos resultados seria simples (ver Figura 5.47).

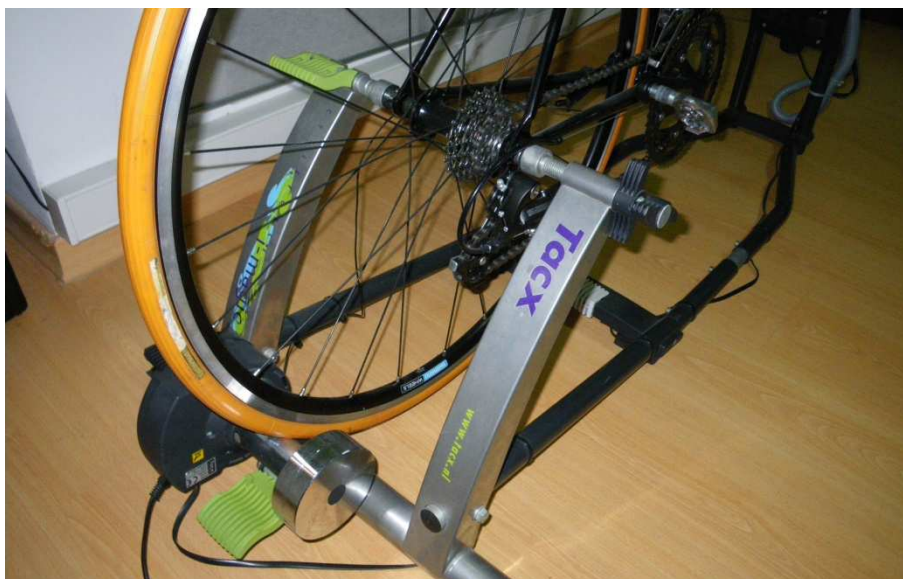


Figura 5.46: Travão electromagnético do rolo

Na impossibilidade de testar um *kit* eléctrico, não foi possível desenvolver esta vertente do trabalho, e ficámos limitados à informação comercial disponível.



Figura 5.47: Software TTS 2 com simulação de percursos

5.5. Validação do Estimador de Percursos - Análise e conclusões

A manutenção de um valor de potência constante torna-se um desafio, dado que não é fácil reagir às variações das condições (inclinação, vento, etc.) de forma imediata, e mantendo a relação entre a cadência de pedalada (função da

velocidade instantânea e das relações na corrente) e a força aplicada nos pedais de modo a aplicar a potência definida.

A dispersão dos valores de potência instantânea é elevada, como se pode constatar pela análise dos gráficos na Fig. 5.40 e Fig. 5.42, mas em termos de valor médio no final do percurso, os valores obtidos foram satisfatórios, variando entre os 74 W e os 83 W (com desvios padrão em percentagem da média de 32% e 27%, respectivamente).

Dadas as diferenças obtidas (ver *Figura 5.40* e Tabela 5.9), e a incerteza relacionada com alguns dos parâmetros e dados considerados (velocidade do vento em cada local, etc.), assume-se que o Estimador de Percursos permite obter dados coerentes com a realidade, e que no âmbito do estudo efectuado nesta dissertação, é válido como uma previsão aproximada da realidade.

6. Avaliação do desempenho do veículo

6.1. Determinação das condições de avaliação (percursos e condições atmosféricas)

O percurso seleccionado para os testes comparativos tem troços comuns ao percurso utilizado nos testes de campo (ver Figura 6. 48), mas com uma extensão superior (63km) e com uma altimetria mais significativa (aproximadamente 320 metros de desnível acumulado).

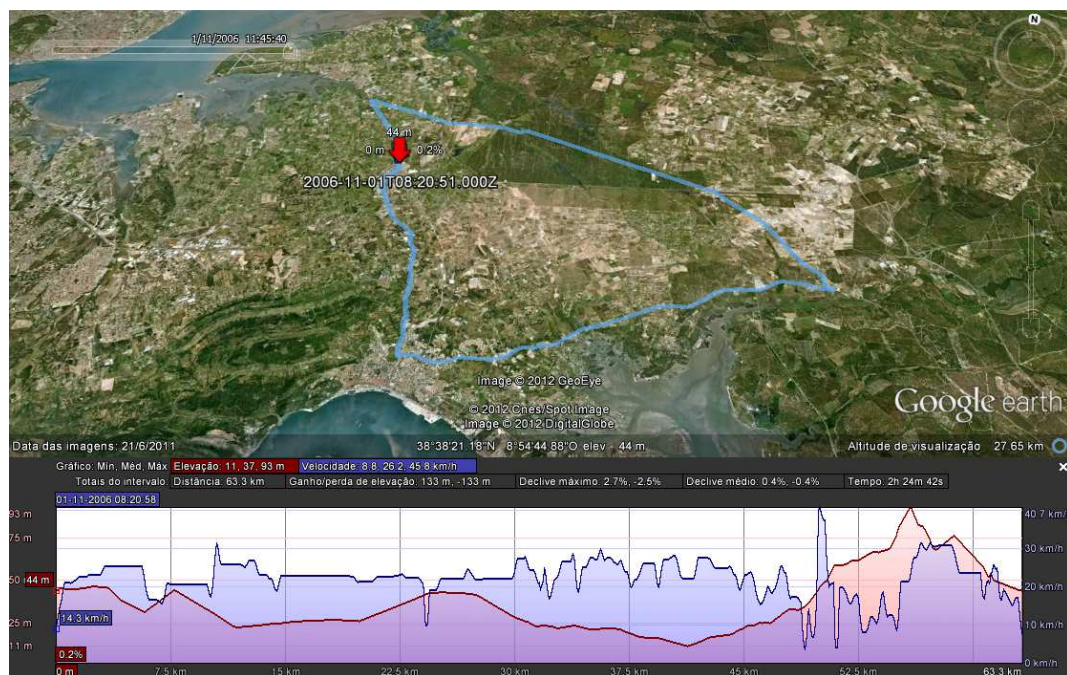


Figura 6. 48: Percurso seleccionado para os testes comparativos

Foram consideradas diferentes condições meteorológicas, representativas do território nacional [48], referentes ao mês de Abril (condições típicas da Primavera e do Outono) e de Agosto (situação mais favorável em termos de radiação solar), assim como de condução nocturna (sem qualquer carga eléctrica durante o percurso), de acordo com os dados apresentados na Figura 6.49.

Lisbon, Portugal - Solar energy and surface meteorology

Variable	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Insolation, kWh/m ² /day	1.91	2.74	4.05	5.09	5.82	6.58	6.59	6.02	4.65	3.14	2.06	1.62
Clearness, 0 - 1	0.44	0.48	0.52	0.53	0.53	0.57	0.59	0.59	0.55	0.49	0.43	0.41
Temperature, °C	9.30	10.29	13.07	14.43	17.65	22.12	24.50	23.82	21.55	17.42	13.28	10.91
Wind speed, m/s	5.73	6.11	5.99	5.85	5.48	5.17	5.28	5.21	4.82	5.00	5.52	6.01
Precipitation, mm	109	110	68	64	39	21	4	5	26	80	111	106
Wet days, d	14.3	14.0	12.8	11.5	8.3	4.9	1.8	1.8	5.8	10.4	13.0	13.8

These data were obtained from the NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center; New et al. 2002

Notes: [Help](#). [Change preferences](#).

Figura 6.49: Valores de referência para a região de Lisboa [48]

Dado que em situação normal (usando o critério para a assistência eléctrica dos restantes) o veículo apresenta carga na bateria, foi efectuada uma avaliação usando uma lógica de assistência eléctrica mais generosa, de acordo com o apresentado na Tabela 6.10, que permita ganhar tempo de viagem, à custa de uma descarga prematura da bateria.

TABELA 6.10 – PARÂMETROS DE ASSISTÊNCIA ELÉCTRICA EXTRA

Desnível (%)	Potencia do utilizador (W)	Assistência eléctrica (Extra)
< -5%	25 W	0%
-5% a 0%	50 W	150 %
0% a 2%	75 W	300%
2% a 5%	100 W	300%
> 5%	125 W	300%

Foi ainda considerada uma simulação para comparação, sem as limitações legislativas da UE, nomeadamente quanto ao limite de potência, que passa a usar um motor de 750 W e ainda quanto ao limite para a velocidade máxima para a qual a assistência eléctrica está disponível (e que é actualmente de 25 km/h).

A legislação foi elaborada tendo em conta as bicicletas, e o peso superior deste veículo, penaliza o desempenho em percursos com desníveis mais acentuados.

Finalmente, foram consideradas comparações de desempenho num percurso longo (193 km) entre Tróia e Sagres (ver Figura 6.50), com um desnível acumulado de 1.260 metros, de modo a avaliar as diferenças de desempenho em situações limite, com extensão claramente superior à autonomia anunciada para o kit BionX (aproximadamente 100 km), e em que a duração permite que os valores de carga solar sejam significativos.

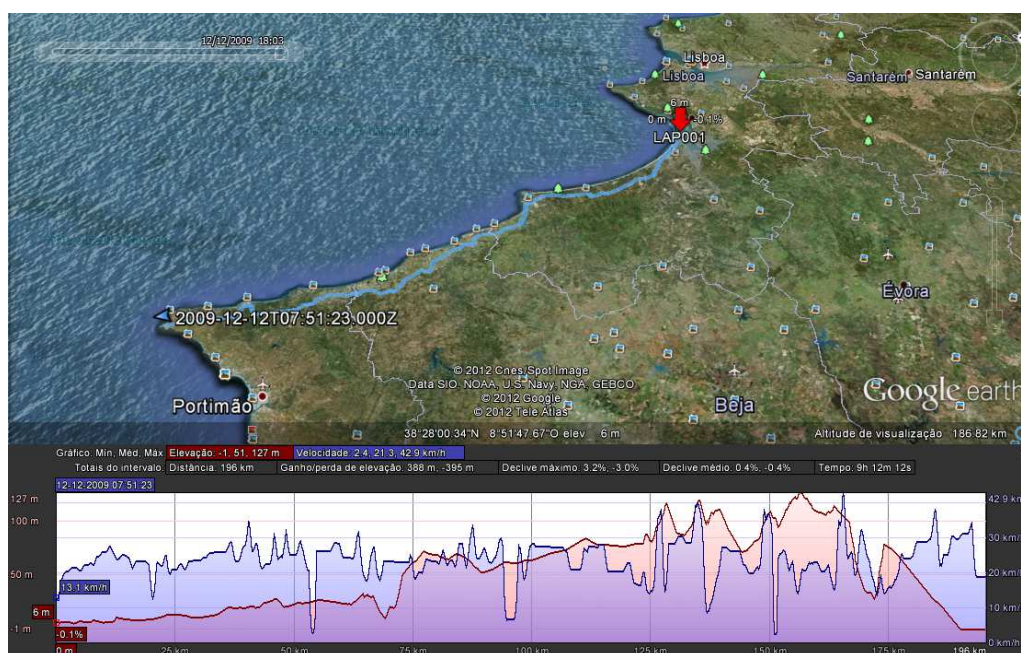


Figura 6.50: Percurso Tróia-Sagres

Neste percurso, prevista para condições de Inverno, de Primavera e de Verão, os parâmetros de assistência foram alterados de modo a permitir um melhor desempenho, face à recuperação de carga da bateria até ao final do trajecto, de modo a ter valores de carga na bateria residuais no final do trajecto.

6.2. Veículos de referência para comparação de desempenho

6.2.1. ROSE PRO2

A bicicleta convencional ROSE PRO2 (ver Figura 6.51) apresenta as características típicas para passeio/transporte, que a tornam uma solução ideal para a utilização como um meio de transporte alternativo [49].



Figura 6.51: Bicicleta convencional Rose PRO2

Esta não tem o desempenho de um veículo de lazer ou competição, mas o peso superior é amplamente compensado pelo conforto, facilidade de utilização e fiabilidade.

A Tabela 6.11 apresenta as características desta bicicleta.

Tabela 6.11 – Características específicas da ROSE PRO2

Característica	Valor
Massa Total	15,4 kg
Coeficiente aerodinâmico	1,1
Área frontal total	0,46 m ²
Coeficiente de resistência de rolamento	0,0031
Coeficiente de resistência de rolamento (componente dependente da velocidade)	0,1
Coeficiente de perdas de transmissão de potência	1,05

6.2.2. ROSE PRO E1

A bicicleta eléctrica ROSE PRO E1 é a versão eléctrica (com o Kit BionX) da bicicleta convencional seleccionada para o teste (ver Figura 6.52). Assim a comparação é limitada aos efeitos da instalação do Kit, dado que os restantes componentes são comuns [50].



Figura 6.52: Bicicleta eléctrica Rose PRO E1

A Tabela 6.12 apresenta as características desta bicicleta.

Tabela 6.12 – Características específicas da ROSE PRO E1 [50]

Característica	Valor
Massa Total	22,5 kg
Coeficiente aerodinâmico	1,1
Área frontal total	0,46 m ²
Coeficiente de resistência de rolamento	0,0031
Coeficiente de resistência de rolamento (componente dependente da velocidade)	0,1
Coeficiente de perdas de transmissão de potência	1,09
Potência máxima do <i>kit</i>	250 W
Diferença de potencial da bateria	48 V
Capacidade da bateria	6,6 Ah
Limite de velocidade de assistência eléctrica	25 km/h

6.2.3. *Trike* com kit eléctrico

O *Trike* com kit eléctrico é baseado no veículo desenvolvido pelo autor em 2011 (ver 3.3) mas equipado com um kit eléctrico BionX (ver Figura 6.53).

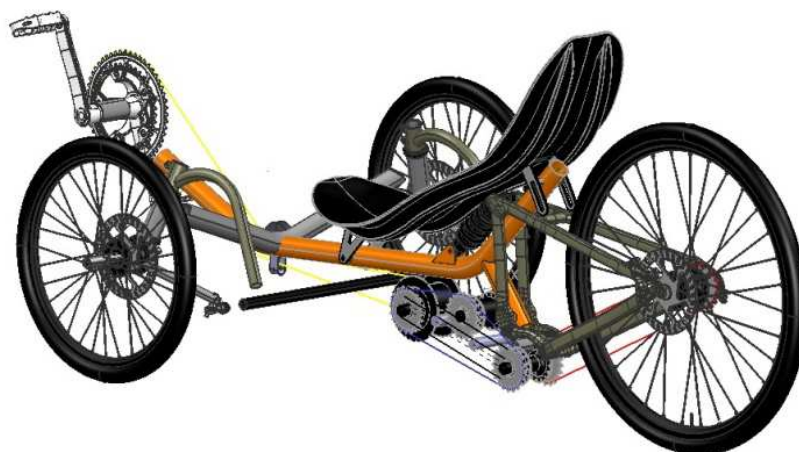


Figura 6.53: *Triciclo reclinado com kit eléctrico*

Dado que foi neste projecto que o veículo em análise neste trabalho foi baseado, a comparação torna-se mais simples, pois apenas difere nas modificações necessárias à instalação dos painéis solares, sendo os restantes componentes comuns.

A Tabela 6.13 apresenta as características deste veículo.

Tabela 6.13 – Características específicas do *Trike* com kit eléctrico

Característica	Valor
Massa Total	28 kg
Coeficiente aerodinâmico	1,1
Área frontal total	0,5 m ²
Coeficiente de resistência de rolamento	0,0045
Coeficiente de resistência de rolamento (componente dependente da velocidade)	0,1
Coeficiente de perdas de transmissão de potência	1,09
Potência máxima do <i>kit</i>	250 W
Diferença de potencial da bateria	48 V
Capacidade da bateria	6,6 Ah
Limite de velocidade de assistência eléctrica	25 km/h

6.2.4. Trike com *kit* eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos

O veículo em análise, equipado com o mesmo *kit* eléctrico dos anteriores e dotado de painéis solares fotovoltaicos para carga permanente durante o dia, está representado na Figura 6.54.

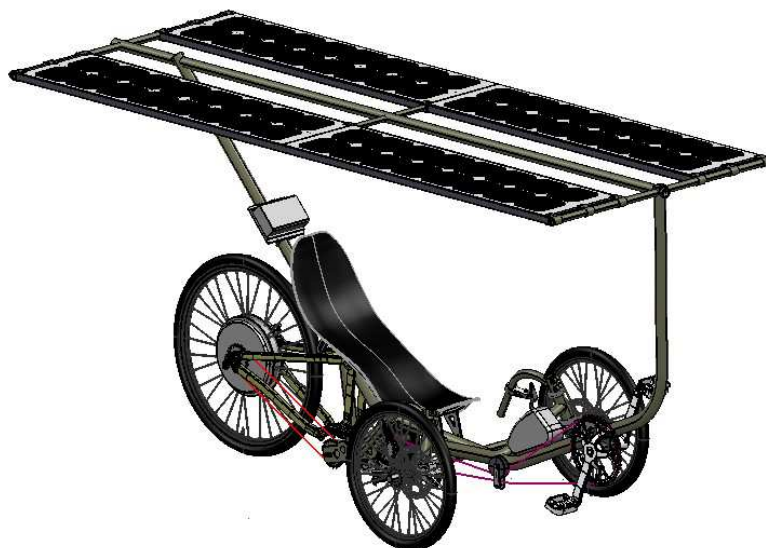


Figura 6.54: Trike reclinado com *kit* eléctrico e equipado com painéis solares fotovoltaicos

As características técnicas são apresentadas na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Características específicas do Trike com *kit* eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos

Característica	Valor
Massa Total	42,8 kg
Coeficiente aerodinâmico	1,1
Área frontal total	0,6 m ²
Coeficiente de resistência de rolamento	0,0045
Coeficiente de resistência de rolamento (componente dependente da velocidade)	0,1
Coeficiente de perdas de transmissão de potência	1,09
Potência máxima do <i>kit</i>	250 W
Diferença de potencial da bateria	48 V
Capacidade da bateria	6,6 Ah
Limite de velocidade de assistência eléctrica	25 km/h
Área total dos painéis	0,9 m ²
Eficiência eléctrica dos painéis	22,5%

6.3. Preços de referência para os veículos

Dado que o preço é um factor determinante na decisão de compra, são apresentados valores de referência para cada um dos veículos (ver Tabela 6.15).

Nas bicicletas Rose este foi obtido directamente do site da empresa, mas no caso dos *trikes*, e na impossibilidade de ter um custo de produção final, foram contabilizados os custos dos componentes (*kit* eléctrico e conjunto de painéis e regulador) directamente dos *sites* dos distribuidores e um valor global para o trike e componentes, baseado no preço de venda ao público de um *trike* de gama média com um nível de equipamento idêntico (o mais semelhante foi o modelo Adventure da marca ICE) [51].

Tabela 6.15 – Preços de referência

Veículo	Preço
Rose PRO2	1.549 €
Rose PRE E1	3.249 €
Trike com Kit Eléctrico	4.298 €
(<i>trike</i> base)	(2.399 €)
(<i>kit</i> BionX)	(1.899 €)
Trike com Kit Eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos	6.987 €
(<i>trike</i> base)	(2.399 €)
(<i>kit</i> BionX)	(1.899 €)
(painéis SP50-L x4)	(2.450 €)
(regulador WRM-15)	(239 €)

Não se pretende apresentar os preços dos *trikes* como um objectivo ou preço final de venda ao público, mas apenas como indicativo, para comparação face às bicicletas comerciais.

6.4. Ensaios de comparação de desempenho e respectivos resultados

De acordo com o exposto no ponto 6.1, foram efectuadas as simulações previstas, sendo os resultados em condições de vento de 10, 20 e 30 km/h (Norte), apresentados nas Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18 respectivamente.

Tabela 6.16 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 10km/h

Vento 10 Km/h (0°)	Ponto Intermédio - 40 km		Percurso Total - 63,3 km			
	Tempo	Vel. Med. (km/h)	Tempo	Vel. Med. (km/h)	% Carga	Dist (até 5%)
ROSE PRO 2	2:06:33	19,0	3:26:51	18,4	-	-
ROSE PRO E1	1:44:40	22,9	2:48:40	22,5	31%	-
e-TRIKE	1:42:25	23,4	2:56:36	21,5	5%	53.279
e-TRIKE SOLAR Noite (0W/m2)	1:46:05	22,6	3:10:58	19,9	5%	51.851
e-TRIKE SOLAR Abril (424 W/m2)	1:46:05	22,6	2:51:53	22,1	59%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (507 W/m2)	1:46:05	22,6	2:51:53	22,1	74%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (assist. extra)	1:43:29	23,2	2:43:00	23,3	12%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (s/ limites)	1:25:44	28,0	2:18:24	27,5	5%	60.799

Tabela 6.17 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 20km/h

Vento 20 km/h (0°)	Ponto Intermédio - 40 km		Percurso Total - 63,3 km			
	Tempo	Vel. Med. (km/h)	Tempo	Vel. Med. (km/h)	% Carga	Dist (até 5%)
ROSE PRO 2	2:06:09	19,0	3:40:19	17,3	-	-
ROSE PRO E1	1:46:09	22,6	2:53:30	21,9	29%	-
e-TRIKE	1:43:29	23,2	3:03:19	20,7	5%	53.279
e-TRIKE SOLAR Noite (0W/m2)	1:47:24	22,3	3:19:05	19,1	5%	51.481
e-TRIKE SOLAR Abril (424 W/m2)	1:47:24	22,3	2:56:30	21,5	58%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (507 W/m2)	1:47:24	22,3	2:56:30	21,5	74%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (assist. extra)	1:45:53	22,7	2:47:56	22,6	10%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (s/ limites)	1:25:01	28,2	2:20:50	27,0	5%	60.799

Tabela 6.18 – Resultados no percurso de 63km, com vento de 30km/h

Vento 30 km/h (0°)	Ponto Intermédio - 40 km		Percurso Total - 63,3 km			
	Tempo	Vel. Med. (km/h)	Tempo	Vel. Med. (km/h)	% Carga	Dist (até 5%)
ROSE PRO 2	2:05:51	19,1	3:38:25	17,4	-	-
ROSE PRO E1	1:48:49	22,1	3:02:01	20,9	26%	-
e-TRIKE	1:45:31	22,7	3:16:35	19,3	5%	52.237
e-TRIKE SOLAR Noite (0W/m2)	1:49:55	21,8	3:32:24	17,9	5%	51.053
e-TRIKE SOLAR Abril (424 W/m2)	1:49:55	21,8	3:05:02	20,5	56%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (507 W/m2)	1:49:55	21,8	3:05:02	20,5	73%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (assist. extra)	1:49:13	22,0	2:55:34	21,7	8%	-
e-TRIKE SOLAR Agosto (s/ limites)	1:24:59	28,2	2:25:22	26,2	5%	60.799

Os resultados referentes às simulações efectuadas para o percurso, sendo os resultados ,em condições de vento de 20 km/h (Oeste), apresentados na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – Resultados no percurso de 193km, com vento de 20km/h (Oeste)

TROIA - SAGRES (20 km/h - 90°)	Percurso Total - 194,5 km			
	Tempo	Vel. Med. (km/h)	% Carga	Dist (até 5%)
ROSE PRO 2	9:21:47	20,8	-	-
ROSE PRO E1	9:07:59	21,3	5%	104.696
e-TRIKE	9:38:15	20,2	5%	100.914
SOLAR e-TRIKE Dezembro (191 W/m2)	8:43:23	22,3	6%	-
SOLAR e-TRIKE Abril (424 W/m2)	8:25:31	23,1	6%	-
SOLAR e-TRIKE Agosto (507 W/m2)	8:11:35	23,7	6%	-

6.5. Análise de resultados dos ensaios

6.5.1. Análise do desempenho no percurso aos 40 km

A recolha de dados de desempenho aos 40 km do percurso permite uma comparação em termos de desempenho puro (ver Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18), numa situação de existência de carga na bateria em todos os veículos testados (com a excepção da bicicleta convencional).

Pode constatar-se que a bicicleta tradicional será a opção mais lenta, com uma velocidade de cerca de 19 km/h, e para minimizar o tempo de deslocação, o *e-Trike* será a escolha acertada, conseguindo nas condições mais favoráveis velocidades médias de 23,4 km/h

A vantagem aerodinâmica da posição de condução reclinada supera os cerca de 6 kg de peso a mais relativamente à bicicleta eléctrica.

A bicicleta eléctrica e o *e-Trike* solar seguem com tempos muito semelhantes (uma diferença de cerca de 0,3 km/h ou 1:30 minutos). Os 20 kg de diferença no peso e o arrasto adicional dos painéis penalizam o *e-Trike*.

No entanto é fundamental analisar o troço inicial do percurso, em que o desnível é menos acentuado que na parte final (começa a subir precisamente por volta do km 45), não penalizando em demasia o excesso de peso.

Também em termos da orientação do vento (definido como de quadrante Norte), é sistematicamente neutra ou marginalmente favorável, e só a partir do km 50, quando o percurso inflecte em direcção a Norte é que o factor vento reduz as prestações dos diferentes veículos de modo significativo.

A observação dos dados relativos à bicicleta convencional revelam que as velocidades médias obtidas aumentam quando o vento fica mais intenso, observando-se um comportamento distinto dos restantes veículos. Tal poderá ser explicado pela menor velocidade a que circula, que torna o efeito do vento contrário menos significativo, e mais intenso quando é auxiliado pelo vento de costas. É ainda o veículo mais leve, logo menos sensível às subidas, o que torna o efeito do vento predominante em termos de limitação de desempenho.

Estes resultados permitem concluir que em situação ideais, (trajectos planos e sem vento frontal), os veículos eléctricos têm desempenhos muito idênticos (diferenças máximas na ordem dos 4 minutos) e que a bicicleta convencional é superada de forma significativa (diferenças de 20 a 24 minutos para o veículo mais rápido).

A diferença estará na eficiência aerodinâmica de cada um dos veículos, e o *e-Trike* com a sua menor altura e área frontal, tem vantagem.

6.5.2. Análise do desempenho no final do percurso de 63 km

Tal como foi referido em 6.5.1, são precisamente os últimos 23 km que apresentam as maiores dificuldades, com uma subida prolongada, e com o percurso a terminar quase alinhado com a direcção do vento (ver Figura 6.49).

São nestes últimos quilómetros que acentuam as diferenças entre os veículos, e revelam as limitações de cada um.

Para as condições nominais de assistência eléctrica inicialmente definidas, idênticas para todos os veículos (ver Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18), o *e-Trike* é testado em 3 situações distintas representativas: sem carga (condução nocturna ou em tempo encoberto, em condições típicas de um dia de Primavera ou Outono ou em condições óptimas de um dia de Verão

O facto mais notório é que o *e-Trike* e o *e-Trike Solar* em situação de ausência de carga esgotam as baterias antes do final do percurso, em virtude do peso mais elevado, que os penaliza na subida final. O facto de efectuarem o final da subida sem assistência eléctrica, e sem a potência adicional, aumenta significativamente a duração do trajecto. No limite, e para ventos de 30 km/h o *e-Trike Solar* tem uma vantagem mínima (cerca de 6 min em 3 horas e meia) relativamente à bicicleta convencional.

O facto de não ter esgotado a carga da bateria e o menor peso tornam a *e-Bike* a opção mais rápida em condições normais, com um tempo de 2:48:40 horas para vento mais intenso.

Mesmo com carga solar, e para condições idênticas, o peso adicional do *e-Trike Solar* não lhe permite alcançar a *e-Bike*, perdendo cerca de 3 minutos. São desempenhos muito equivalentes, em termos de tempo e velocidade média, mas a carga remanescente é distinta.

O desempenho em termos de tempo final do *e-Trike Solar* não é afectado pela diferença de intensidade luminosa.

No final do percurso a bicicleta eléctrica está no final da sua carga (na ordem de 25%), sem grande autonomia restante, enquanto que o *e-Trike Solar* apresenta uma carga disponível entre os 59% e os 56% para a condição primaveril e entre os 74% e os 73% para o pico do Verão.

Apesar da *e-Bike* ser mais rápida neste período, estará perto de esgotar a bateria, enquanto que o *e-Trike Solar* ainda terá condição para duplicar ou triplicar a distância percorrida ainda com carga, conforme se trate de condições médias para o mês de Abril ou para Agosto.

6.5.3. Análise do desempenho em condições de carga extra

A carga eléctrica adicional disponível por via do painel fotovoltaico, permite ao condutor do *e-Trike Solar* gerir o nível de assistência eléctrica de um modo diferente, podendo usar os níveis de assistência superior durante mais tempo.

Foram alterados os pressupostos de decisão do nível de assistência eléctrica em função do declive, de modo a reduzir a duração do percurso e assegurando que o veículo ainda têm alguma carga na bateria no final (ver Tabela 6.10).

Os tempos obtidos são melhorados significativamente, (ver Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18), superando desta vez o desempenho da *e-Bike*, com diferenças na ordem dos 6 a 7 minutos. Tal representa uma redução de 10 a 12 minutos relativamente às condições de condução normal.

Os níveis de carga disponível no final do percurso são semelhantes, sendo que restarão entre 8% a 12% no *e-Trike Solar* (dependendo o vento considerado) e 26% a 31% na *e-Bike*.

As velocidades médias atingidas andam entre os 23,3 km/h e 21,7 km/h, já muito perto do limite a partir do qual a assistência eléctrica deixa de actuar. Para tal, o veículo passou grande parte do percurso com uma velocidade muito perto do limite.

Dado que os valores de potência humana aplicada são relativamente baixos, mesmo para uma situação de utilização contínua do nível máximo de assistência eléctrica (+300%), a velocidade média final não seria superior aos 25 km/h. Este será um limite de desempenho comum aos veículos eléctricos com estas características.

6.5.4. Análise do desempenho em condições de carga extra e sem restrições legais

As restrições da legislação nacional, com o motor limitado a 250W, e o limite de assistência eléctrica até aos 25 km/h, que foram definidas inicialmente para bicicletas eléctricas, são excessivamente limitativas para o desempenho de um veículo com um peso superior a 40 kg, especialmente em situações de desnível significativo.

A legislação em vigor noutros países, nomeadamente os E.U.A. permite potências até aos 750 W, e limita a velocidade aos 32 Km/h [52].

Nestas condições , o desempenho dinâmico do *e-Trike* muda radicalmente (ver Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18), permitindo tempos finais entre 2:20 e 2:25 horas, dependendo da intensidade do vento, com velocidades médias superiores a 27 km/h.

São reduções de cerca de 33 minutos relativamente ao *e-Trike* Solar em condições normais ou de 30 minutos relativamente à *e-Bike*.

E numa situação em que a bateria se esgotou de forma quase marginal (ficou sem assistência eléctrica a 2 Km do final do percurso) e com um nível de esforço mínimo por parte do condutor (com potência aplicada de 75 W).

Para poder enquadrar este nível desempenho, e obter um termo de comparação, foram consultados os registos de treino do autor, que já efectuou o mesmo percurso com tempos equivalentes (2:22:40 horas no registo de treino de 28/11/2010).

As condições que permitiram atingir este desempenho foram totalmente distintas, utilizando uma bicicleta de estrada com cerca de 8,5 Kg, e com uma intensidade de esforço e cansaço muito superior.

Os valores de potência média durante o percurso foram de 185 W (com um máximo de 508 W) e a um ritmo cardíaco médio de 150 pulsações por minuto (com um máximo de 172).

6.5.5. Análise do desempenho em percursos longos

Com 4 painéis solares com uma potência total nominal anunciada de 200 W, e um motor limitado a 250W, em condições favoráveis de radiação solar a autonomia do *e-Trike* Solar será considerável, e terá vantagens mais significativas face aos restantes tipos de veículos em análise.

Os 193 Km do percurso, já com uma altimetria significativa, são o derradeiro desafio para qualquer veículo a pedal (ver Fig. 6.50).

Assumindo que não há qualquer consequência do facto do condutor pedalar continuamente durante tantas horas, e que a gestão da carga no *e-Trike* Solar é efectuada de modo a chegar ao destino com uma carga residual na bateria, os resultados são esclarecedores (ver Tabela 6.19).

De acordo com os dados da *Tabela 6.19*, o *e-Trike* tem o pior desempenho, demorando 9:38 horas para concluir o percurso. O facto de ter esgotado a bateria aos 100 Km, e de ter de percorrer os 90 km finais (que são os mais acidentados e têm grande parte do desnível total), com a penalização do peso adicional de um kit eléctrico inerte, justifica este resultado.

A bicicleta tradicional, com um tempo de 9:22 horas consegue superar o *e-Trike*. Apesar de perder terreno enquanto ainda tem carga na bateria, a partir do momento em que esta termina, o peso reduzido e as subidas que se seguem permitem a recuperação, obtendo uma vantagem final de cerca de 16 minutos no final.

A *e-Bike* esgota a sua bateria aos 104 km, mas com uma desvantagem do peso adicional face à bicicleta convencional (apenas 7 kg) menos significativa, é

suficiente para conseguir um tempo final de 9:08 horas, mantendo a dianteira sobre a bicicleta, com uma vantagem de cerca de 14 minutos.

Os resultados obtidos em termos da autonomia estimada são significativos, e coincidentes com a documentação comercial, pois a marca anuncia uma autonomia superior a 100 km [49 e 50].

As características do *e-Trike* Solar dão-lhe uma clara vantagem neste tipo de trajecto, obtendo um ganho de 1:10 horas sobre a bicicleta convencional e de cerca de 58 minutos face à *e-Bike*, nas condições mais favoráveis. E ainda com uma carga residual na bateria.

A variação da intensidade solar disponível provoca diferenças na duração do percurso, com um aumento de cerca de 14 minutos na Primavera face ao desempenho estimado para o Verão, e mais 32 minutos para condições típicas de Inverno.

No entanto mesmo em condições de energia solar disponível em valores mínimos anuais, a vantagem sobre a *e-Bike* ainda é significativa (19 minutos).

7. Conclusões

7.1. *Trike* com *Kit* Eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos - Limitações e desvantagens

Os resultados obtidos no Estimador de Percursos demonstram o potencial deste tipo de veículos para uma utilização regular, mas foram também identificadas algumas limitações no conceito analisado e mesmo desvantagens face às opções mais comuns e já disponíveis no mercado.

O primeiro aspecto abordado tem a ver com a facilidade e prática na utilização regular deste tipo de veículos:

- São difíceis de manipular e transportar dado o peso elevado e um volume muito significativo. Não é possível colocá-lo num elevador ou escada e/ou guardá-lo num sótão. O transporte no interior de um automóvel é inviável, a colocação no tejadilho é apenas possível com pelo menos duas pessoas, sendo a opção mais razoável a utilização de um atrelado.
- As manobras em espaços limitados são difíceis de realizar dada a dimensão e raio de viragem. Em situações limite o condutor terá de sair do veículo para o arrastar até à posição desejada.
- A superação de pequenos obstáculos comuns em meio urbano são delicadas, e actos tão naturais para um ciclista como subir passeios e descer alguns degraus são complicados de efectuar. Este veículo é mais adequado para circulação em ciclovias ou estradas.
- Numa situação de falta de carga na bateria (avaria ou condução nocturna) o peso adicional é penalizador para percursos significativos, tal como apresentado no capítulo anterior. Não é no entanto um factor impeditivo caso seja necessário efectuar apenas um trajecto curto.
- O veículo não foi ainda testado e com a configuração actual dos painéis fotovoltaicos poderá ser relativamente sensível a ventos laterais, possibilitando situações potencialmente perigosas para o condutor ou outros utentes da via pública.

No entanto, será o preço o factor mais limitativo em termos da sua divulgação e utilização. Com custos de referência na ordem do dobro de uma *e-Bike* e muito superiores a uma bicicleta convencional, a sua utilização apenas em trajectos curtos urbanos é praticamente inviável, face aos ganhos marginais na duração do trajecto.

Mesmo em termos de desempenho, para trajectos com extensão inferior à autonomia de uma *e-bike*, não terá qualquer vantagem, caso use um motor com potência idêntica. À medida que a distância se aproxima do limite de autonomia da

bicicleta eléctrica , e que com o tempo os painéis solares recuperam alguma carga na bateria, poderá ser possível recuperar usando valores de assistência mais elevados (tipicamente para 50 km, com base nos equipamentos testados).

As vantagens deste veículos em termos de autonomia superior também são atenuadas, no caso de deslocações diárias para o local de trabalho, ou onde o utilizador de uma *e-bike* tenha possibilidade de carregar a bateria durante algumas horas, antes de regressar, ou completar o percurso, ao final do dia (tipicamente 40 km + 40 km, com base nos equipamentos testados).

7.2. Trike com Kit eléctrico equipado com painéis solares fotovoltaicos – Vantagens e potencial de desenvolvimento

Apesar dos argumentos desfavoráveis enunciados em 7.1, os resultados obtidos no Estimador de Percursos apontam situações de clara vantagem para o *e-Trike Solar*:

- Percursos com extensão superior à autonomia de uma *e-bike* (tipicamente para 50 km, com base nos equipamentos testados).
- Percursos de longa duração, mesmo em condições de radiação solar reduzida.

Foram ainda identificadas algumas situações específicas em que as características e capacidades deste tipo de veículo podem ser soluções adequadas:

- Utilização numa área ou percursos onde não seja possível carregar a bateria de modo regular. Desde que exposto ao sol, o veículo estará em carga e sempre disponível para uso.
- Utilização em trajectos de vários dias ou em passeios, onde a assistência eléctrica constante e a independência de locais de carga com acesso à rede seja necessária.

Estas vantagens apresentadas são baseadas no pressuposto de utilização de um *kit* de 250 W e com assistência até aos 25 km/h. No entanto a possibilidade de aumento de potência de assistência abre um maior âmbito de utilização e vantagens face às *e-bikes*.

A maior disponibilidade de potência permite a utilização em percursos com desníveis significativos, condição em que o peso adicional do *e-Trike Solar* é penalizador, com desempenho idêntico a uma *e-bike* mais leve.

Permite também um desempenho superior, mesmo em percursos em que a *e-bike* não esgotasse a sua bateria.

Um aumento da área de painéis (perfeitamente viável dado que facilmente se poderá alargar o painel superior e reduzir a abertura o meio) permite potenciar estas vantagens.

Finalmente, há que salientar ainda, que o veículo não foi sujeito a um desenvolvimento exaustivo, pelo que as especificações e capacidades resultantes finais serão superiores, permitindo superar as vantagens que já se verificam, e minimizar as desvantagens em relação aos equipamentos comerciais correntes.

Factores críticos limitativos poderão ser significativamente melhorados com um estudo mais profundo, com grande impacto em termos de melhoria de desempenho, tais como:

- peso do quadro,
- selecção de componentes e peso total do veículo
- eficiência aerodinâmica em termos de arrasto e estabilidade lateral
- minimização de perdas mecânicas

Há ainda que considerar o potencial para o desenvolvimento dos equipamentos fotovoltaicos e sistemas de carga. A procura crescente por este tipo de componentes e produtos levará inevitavelmente ao aparecimento de soluções mais sofisticadas e com maior eficiência, e a preços bem mais acessíveis, provocando um reposicionamento do *e-Trike* Solar em termos financeiros, relativamente às outras alternativas actuais.

7.3. Conclusões finais e sugestões para investigação futura

7.3.1. Conclusões finais

De acordo com o exposto anteriormente, fica demonstrada a pertinência no desenvolvimento deste tipo de veículo, dadas as vantagens de desempenho que puderam ser quantificadas, e de todo o potencial de evolução apresentado.

Existe obviamente um risco associado, especialmente se questionada a vertente da viabilidade e rentabilidade económica associadas. Este foi um aspecto abordado de modo superficial, dado que não estão disponíveis dados financeiros, nem fazia parte dos objectivos deste projecto apresentar um estudo de viabilidade económica.

Relativamente aos objectivos propostos para este projecto, foram sido plenamente atingidos, sendo concluídas as principais tarefas propostas:

- ✓ Levantamento e selecção de componentes para integrar no veículo
- ✓ Elaboração de um projecto preliminar
- ✓ Determinação das características significativas do veículo

- ✓ Identificação dos parâmetros e equações que condicionam o desempenho dinâmico de um veículo
- ✓ Definição de protocolos para simular o comportamento do condutor
- ✓ Elaboração de um Estimador de Percursos
- ✓ Definição e execução de testes para validação do Estimador de Percursos
- ✓ Análise dos resultados dos testes e validação do Estimador de Percursos
- ✓ Selecção de veículos de referência para comparação de desempenho
- ✓ Definição das condições de ensaio (percursos e parâmetro ambientais)
- ✓ Determinação e compilação dos valores de desempenho
- ✓ Análise dos resultados

No entanto são ainda de referir alguns aspectos que ficaram aquém das expectativas pretendidas, e que poderiam ter acrescentado mais valor ao trabalho efectuado, consequência dos recursos escassos disponíveis para a realização deste projecto.

A possibilidade de acesso a alguns componentes fundamentais, tais como uma bicicleta eléctrica, um *kit* de assistência eléctrica ou a painéis solares, poderia alargar o leque de testes ao Estimador de Percursos, possibilitando a respectiva validação com base em dados obtidos num âmbito mais vasto.

Tal como a possibilidade de adaptar um protótipo, equipado com um *kit* eléctrico e painéis solares, que poderia ter permitido confirmar experimentalmente alguns dos dados obtidos.

Mas tal não comprometeu a consistência dos resultados obtidos nem as respectivas conclusões.

7.3.2. Sugestões para investigação futura

No decorrer deste trabalho deparam-se com alguns aspectos merecedores de uma investigação mais profunda, que não estavam no âmbito restrito deste projecto, mas que serão fundamentais no caso da sua continuidade.

Alguns destes aspectos são a consequência do trabalho exploratório desenvolvido, uma consequência dos resultados obtidos, outros aspectos não foram aqui abordados, quer por falta de conhecimento do autor nas matérias, quer por falta de disponibilidade, dado que por si só, justificam uma tese própria.

Sugestões para investigação futura:

- Dimensionamento e optimização do quadro, com vista a uma redução do peso.

- Análise e optimização da aerodinâmica do veículo, para uma redução da resistência e da estabilidade do veículo em caso de ventos laterais
- Desenvolvimento e teste de equipamento de estabilização de corrente para carga das baterias, dado que em condições de circulação os painéis fotovoltaicos originam uma corrente eléctrica variável, e os equipamentos comerciais estão preparados para carga a partir da rede eléctrica.
- Continuidade ao trabalho desenvolvido no Estimador de Percursos, de modo a criar uma ferramenta de selecção de uma *e-bike* do mercado, a mais adequada em função do percurso pretendido por cada utilizador, criando uma aplicação ou uma ferramenta *Web*.

Bibliografia

- 1 WALLE, Frederik – "The velomobile as a vehicle for more sustainable transportation". Royal Institute of Technology, (2004), ISSN: 1651-0194
- 2 PAIS, Manuela -MATA,Duarte - "Plano da rede ciclável de Lisboa". C.M.L, (2007)
- 3 www.lafn.org/~dave/trans/energy/bicycle-energy.html#aero_drag, visitado 28/6/2012
- 4 ROSE, Geoff - COCK, Peter - "Encouraging e-bike use : the need for regulatory reform in australia". Institute of Transport Studies, (2003)
- 5 www.worldsolarchallenge.org, visitado a 18/3/2012
- 6 www.solarcarchallenge.org/challenge, visitado a 3/9/2012
- 7 www.solarbikeproject.com, visitado a 9/3/2012
- 8 www.electric-bikes.com, visitado a 9/3/2012
- 9 www.ridekick.com, visitado a 9/3/2012
- 10 www.florianbailly.typepad.com, visitado a 9/3/2012
- 11 www.avdweb.nl, visitado a 20/2/2012
- 12 www.naturplan.de, visitado a 9/3/2012
- 13 www.seedace.info, visitado a 4/9/2012
- 14 www.abc.net.au/science/riders/challenge.htm, visitado a 4/9/2012
- 15 www.recumbents.com/wisil/hein/Hpvpaper.htm, visitado a 28/6/2012
- 16 "Human power -Technical journal of the IHPVA-Number 54 Spring 2003". International Human Powered Vehicle Association
- 17 "EN 14764 - City and trekking bicycles - Safety requirements and test methods" CEN, (2005)
- 18 ROETYNCH, Annick - "E-bike and pedelec legislation in the European Union", ETRA, (2001)
- 19 REGNIER, Justin - VAN GELDER, Eric - CONGLETON, Christopher - "The pedal electric tricycle project". University of California, (2005)
- 20 "BionX - Systems 2012" , © 2011 BionX International Corporation
- 21 "BionX - User Manual Limited Edition PL250HT SL XL", © 2011 BionX International Corporation
- 22 www.ciclotek.com, visitado a 28/2/2012
- 23 <http://ecospot-conversion.blogspot.pt>, visitado a 13/3/2012
- 24 "FLEX SP50-L - Brochure" , Solar Pty Ltd, (2012)
- 25 "Flexible Solar Panel Kits" , Solar Pty Ltd, (2012)
- 26 "WRM-15 - Brochure" , Solar Pty Ltd, (2012)
- 27 www.solarfuture.com.au, visitado a 4/9/2012
- 28 www.lensunhk.com, visitado a 28/2/2012

- 29 GORMAN, Timothy - "Determination of optimum steering trailing arm angle for a 3-wheel HPV", (1997)
- 30 www.faro.com, visitado a 4/9/2012
- 31 www.kreuzotter.de/english/efeder.htm, visitado a 9/3/2012
- 32 GILLESPE, Thomas – “Fundamentals of vehicle dynamics”. Society of Automotive Engineers, Inc., (1992), ISBN 978-1-56091-199-9.
- 33 JAZAR, Reza – “Vehicle Dynamics – Theory and application”. Springer, (2008), ISBN: 978-0-387-74243-4
- 34 ABBOTT, Allan - WILSON, David, "Human-powered vehicles", Human Kinetics, (1995), ISBN-10: 0873228278
- 35 MCMAHON, C.J. - GRAHAM, C.D., "The Bicycle & the Walkman", Merion (1992), ISBN-10: 0964659808
- 36 www.wiki.vanguardsw.com/bin/browse.dsb?det/Engineering/Mechanical/Bike%20Race%20Simulation, visitado a 7/3/2012
- 37 GROSS, A. - KYLE, C. - MALEWICKI, D. , "The aerodynamics of human-powered land vehicles", Scientific American, (1983)
- 38 www.efluids.com/efluids/pages/bicycle.htm, visitada a 4/9/2012
- 39 DRELA - LANGFORD, "Human-powered flight", Scientific American, (1985).
- 40 www.princeton.edu/humcomp/bikes/hist/histo_28.htm, visitado a 9/3/2012
- 41 www.knmi.nl/samenw/hydra/faq/profile.htm, visitado a 28/6/2012
- 42 www.wind-data.ch/tools/profile.php?lng=en, visitado a 4/9/2012
- 43 www.webmet.com/met_monitoring/625.HTML, visitado a 9/3/2012
- 44 www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html, visitado a 6/2/2012
- 45 www.rus-roads.ru/gps/help_ozi/fileformats.html, visitado a 6/2/2012
- 46 www.windguru.com, visitado a 27/5/2012
- 47 "Polar HRM2 file format description- Version 1.4", © Polar Electro , (2005)
- 48 www.gaisma.com, visitado a 9/4/2012
- 49 www.rosebikes.co.uk/article/rose-activa-pro-ii-566233/aid:566235, visitado a 19/8/2012
- 50 www.rosebikes.co.uk/article/rose-activa-pro-e1-trekking-pedelec/aid:577976, visitado a 19/8/2012
- 51 www.icetrikes.co/explore-our-trikes, visitado a 19/8/2012
- 52 <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-107publ319/html/PLAW-107publ319.htm>, visitado a 16/9/2012

ANEXOS

Anexo 1 – Proposta de Projecto para DISSERTAÇÃO (1/3/2012)

Anexo 2 – Plano de Trabalho – Versão preliminar (6/3/2012)



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Proposta de Projecto para DISSERTAÇÃO

Ano Lectivo 2011/2012

Identificação	
Título:	Análise e avaliação de performance e condições de operação para um veículo a pedais com assistência elétrica equipado com painéis solares fotovoltaicos
Orientador:	António Mourão (ajfm@fct.unl.pt)
Área científica principal:	DEMI - Núcleo de Projecto de Máquinas
Co-orientador	João Lopes de Carvalho
- E_mail:	jic@fct.unl.pt
- Telemóvel	
Entidade onde o projecto é desenvolvido (e endereço):	
Identificação do aluno:	PEDRO GONÇALO DA CONCEIÇÃO LOPES HOMEM
- E_mail	p.homem@netcabo.pt
- Telemóvel	91 250 2288

Objectivos do projecto

O projeto pretende avaliar a viabilidade e as reais vantagens deste tipo de configuração, para um futuro desenvolvimento de veículos a pedais com assistência elétrica equipados com painéis solares, fazendo a comparação da sua performance teórica estimada, com as alternativas atualmente disponíveis no mercado. Análise dos resultados, e identificação das potencialidades e das limitações deste tipo de veículos.

Descrição do projecto – tarefas principais

Levantamento dos equipamentos e sistemas disponíveis do mercado.
Elaboração de um pré projeto de um veículo para ser utilizado como referencia.
Determinação dos parâmetros significativos (e respetivos valores de referencia) que caracterizam a dinâmica deste tipo de veículos.
Elaboração de aplicativo para avaliar o desempenho de um tipo de veículo, num percurso específico obtido através de um GPS.
Testes práticos em alguns dos percursos seleccionados (a definir de acordo com os veículos/equipamentos disponíveis), para determinar desvios entre os valores estimados teoricamente e a realidade.
Comparação entre diferentes configurações de veículos, em percursos significativos idênticos e com condições equivalentes.
Análise de resultados e elaboração de conclusões.

Observações

O aplicativo poderá ser usado pelo público em geral como suporte para a seleção dos equipamentos mais adequados para um percurso rotineiro, ou para estimar a autonomia num determinado percurso a realizar.

Item	Descrição	Status	MARÇO				ABRIL				MAIO				JUNHO				JULHO				AGOSTO				SETEMBRO										
			WK10	WK11	WK12	WK13	WK14	WK15	WK16	WK17	WK18	WK19	WK20	WK21	WK22	WK23	WK24	WK25	WK26	WK27	WK28	WK29	WK30	WK31	WK32	WK33	WK34	WK35	WK36	WK37	WK38	777					
1.1	Formulação e apresentação da proposta de tese	50%																																			
1.2	Definição de objetivos e elaboração de plano de trabalho	50%																																			
1.3	Conclusão de documento de apresentação	20%																																			
1.4	Contacto com patrocinadores/sponsors com vista a angariar apoios para os testes e eventual construção de protótipos	0%																																			
1.5	Elaborar draft/estrutura para relatório	0%																																			
1.6	Definir testes a efectuar	0%																																			
2.1	Pesquisa de publicações/documentação disponível sobre a temática	0%																																			
2.2	Levantamento de componentes/equipamentos disponíveis no mercado	5%																																			
2.3	Contacto c/ fornecedores com vista a obter informação técnica detalhada	0%																																			
2.4	Seleção dos componentes para o desenvolvimento preliminar do veículo	5%																																			
2.5	Modelação 3D do veículo	20%																																			
2.6	Determinação das características dinâmicas significativas	0%																																			
3.1	Caracterização dinâmica da performance de veículos	5%																																			
3.2	Determinação/recolha de valores de referencia para as características significativas	0%																																			
3.3	Seleção de percursos de referencia para teste	5%																																			
3.4	Desenvolvimento de aplicação para importação de track GPS	5%																																			
3.5	Determinação do algoritmo de decisão do ciclista e respectivos parametros	5%																																			
3.5	Desenvolvimento de aplicação para determinação da performance do veículo para cada troço linear	0%																																			
3.6	Teste de campo com bicicleta s/ motor equipada com sensor de potencia	0%																																			
3.7	Comparação dos resualtos teóricos com os obtidos experimentalmente	0%																																			
3.8	Revisão/correções ao trabalho anteriormente desenvolvido	0%																																			
4.1	Determinação das diferentes condições a usar para a determinação teorica	0%																																			
4.2	Elaboração de tabelas de resultados individuais por percurso/parametros	0%																																			
4.3	Elaboração de graficos/tabelas comparativas entre as diferentes simulações	0%																																			
4.4	Análise e conclusões	0%																																			
5.1	Testes complementares (dependente dos equipamentos disponíveis)	0%																																			
5.2	Construção e montagem de protótipo (dependente dos apoios e testes com o protótipo (dependente da sua construção e nível de desenvolvimento)	0%																																			
5.3	Testes com o protótipo (dependente da sua construção e nível de desenvolvimento)	0%																																			
6.1	Compilação e organização da documentação	0%																																			
6.2	Elaboração do relatório - Inicial	0%																																			
6.3	Elaboração do relatório - 1ª revisão	0%																																			
6.4	Elaboração do relatório - final	0%																																			
7.1	Entrega do Relatório de Dissertação	0%																																			
7.2	Apresentação/discussão da Dissertação	0%																																			
		STATUS ACTUAL	5%																																		